



---

# Avogadro e Planck, due costanti esatte nel SI

Enrico Massa

Congresso LS OSA - 27 gennaio 2022

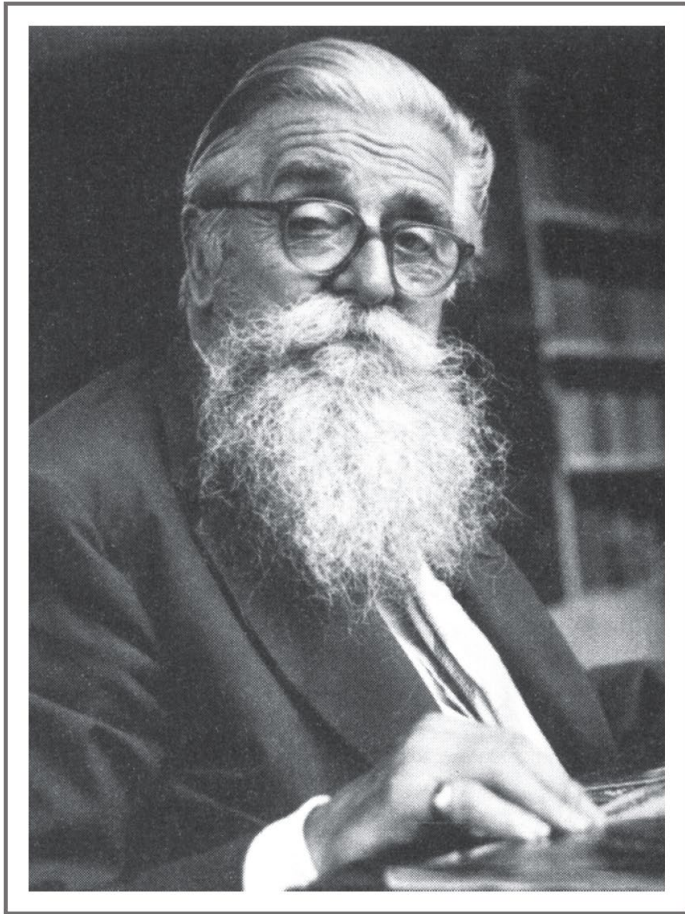
# La rivoluzione del Sistema Internazionale



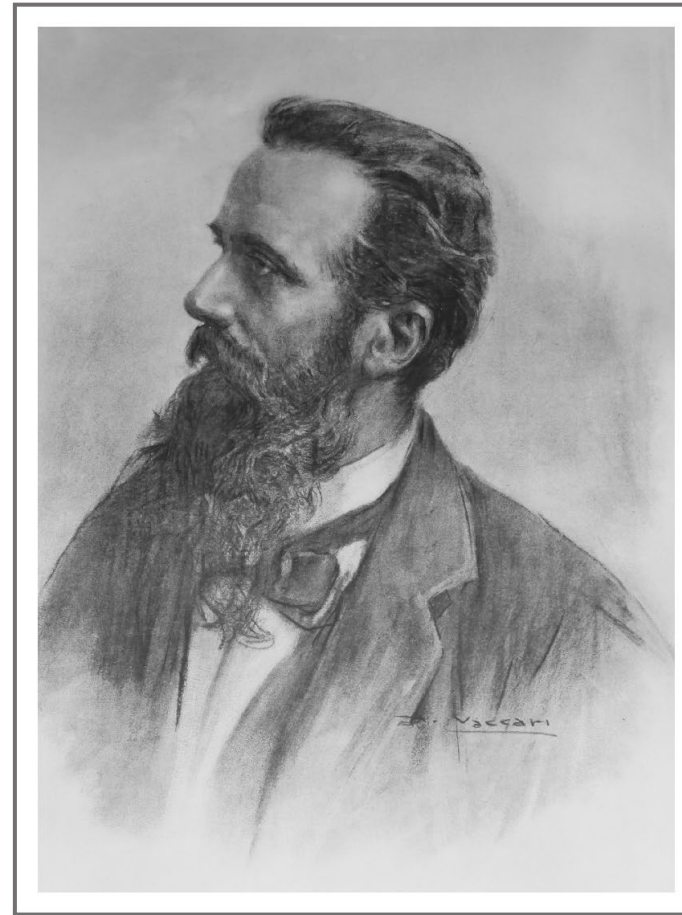
La rivoluzione è avvenuta con la partecipazione di INRIM e di molti altri Istituti Metrologici Nazionali dei paesi aderenti alla Convenzione del Metro

# INRIM – Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica

CNR-IMGC Istituto di Metrologia «Gustavo Colonnetti» + IENGF Istituto Elettrotecnico Nazionale «Galileo Ferraris»



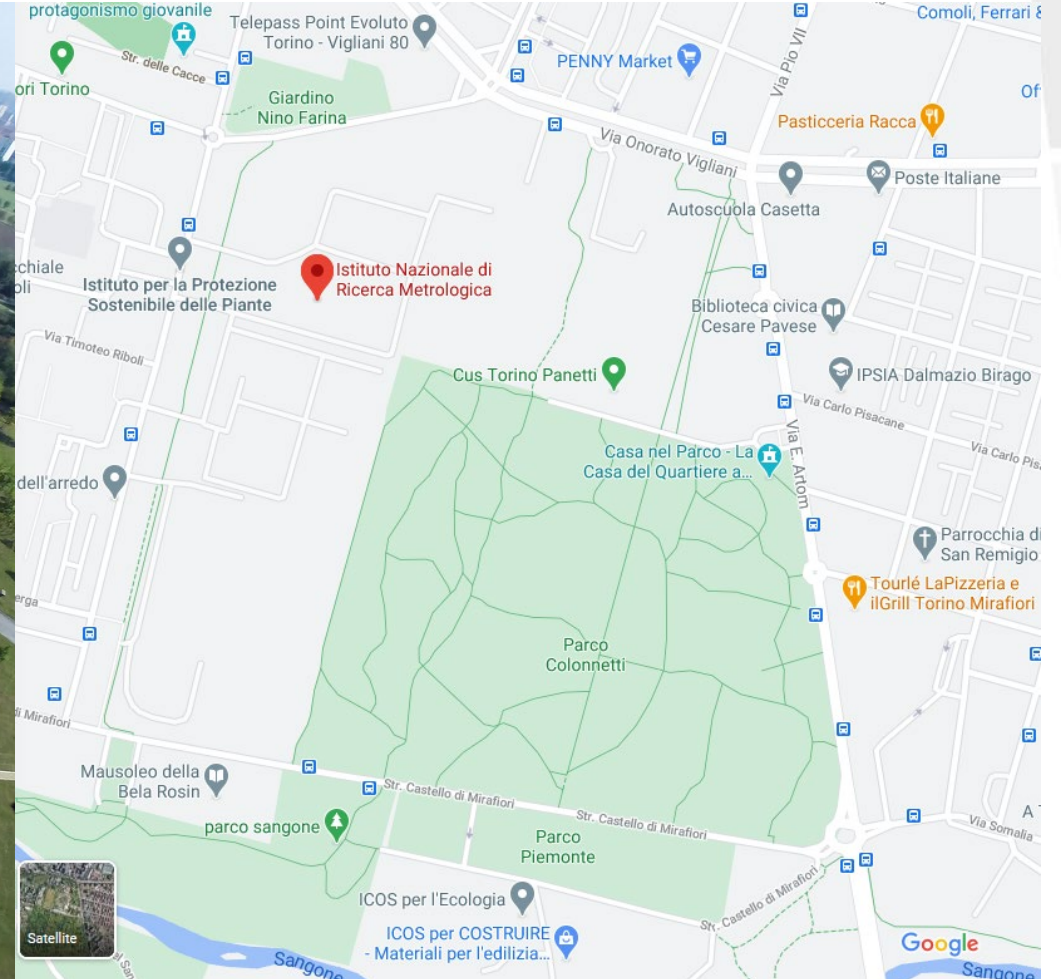
GUSTAVO COLONNETTI



GALILEO FERRARIS



# INRIM – Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica





# INRIM – Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica

L'**INRIM** è un **ente pubblico di ricerca scientifica** che svolge per l'Italia le funzioni di **istituto metrologico nazionale**, costituendo il presidio di gran parte della metrologia, la scienza delle misure.

L'**INRIM** realizza, mantiene e sviluppa i **campioni di riferimento nazionali** delle sette unità di base del **Sistema Internazionale (SI)** - metro, kilogrammo, secondo, ampere, kelvin, mole e candela - e delle rispettive unità derivate. Attraverso tali campioni garantisce l'affidabilità delle misure a livello nazionale e la loro comparabilità a livello internazionale.

L'attività metrologica fondamentale è sostenuta e affiancata dalla ricerca di base e applicata in numerosi settori: la **scienza dei materiali**, le **nanoscienze**, l'**ottica quantistica**, lo **sviluppo di tecnologie e strumenti di misura innovativi**.

Conferenze, mostre, manifestazioni e congressi sono lo strumento con cui l'**INRIM** **comunica e divulga** i risultati delle proprie ricerche. Assicura la **formazione e l'addestramento** di giovani ricercatori attraverso corsi di dottorato, borse e assegni di ricerca.

L'**INRIM** opera a sostegno del **Sistema Nazionale di Taratura**, garantendo la qualità dei riferimenti metrologici e curando la disseminazione dei campioni nazionali delle unità di misura.

# Quando l'uomo inizia a misurare?

L'esigenza della misura (quantificazione delle cose del mondo) nasce con la civiltà.

Ogni civiltà evoluta ha lasciato tracce di sistemi di misura.



tempo (grandezza immateriale), massa e lunghezza (grandezze fisiche)



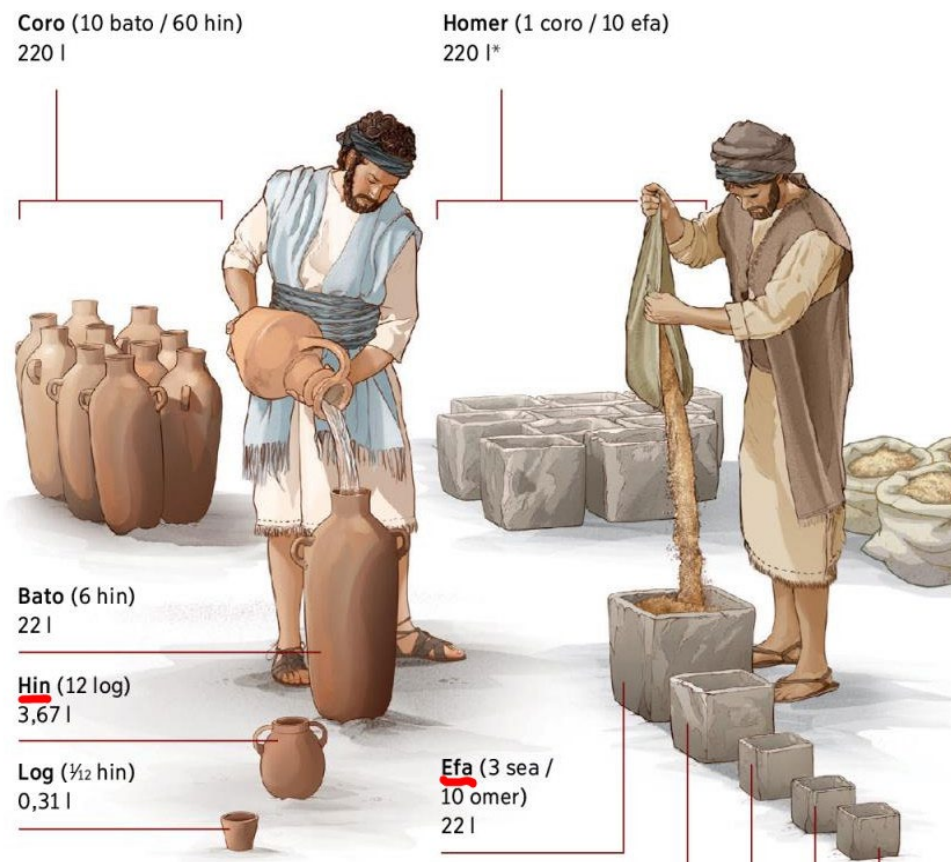
# La misura giusta è fondamento di giustizia



Non avrai nel tuo sacchetto due pesi diversi, uno grande e uno piccolo. Non avrai in casa due tipi di misure, una grande e una piccola. Terrai un peso completo e giusto, terrai una misura completa e giusta [...]

[Deuteronomio 25:13-16]

# La misura giusta è fondamento di giustizia



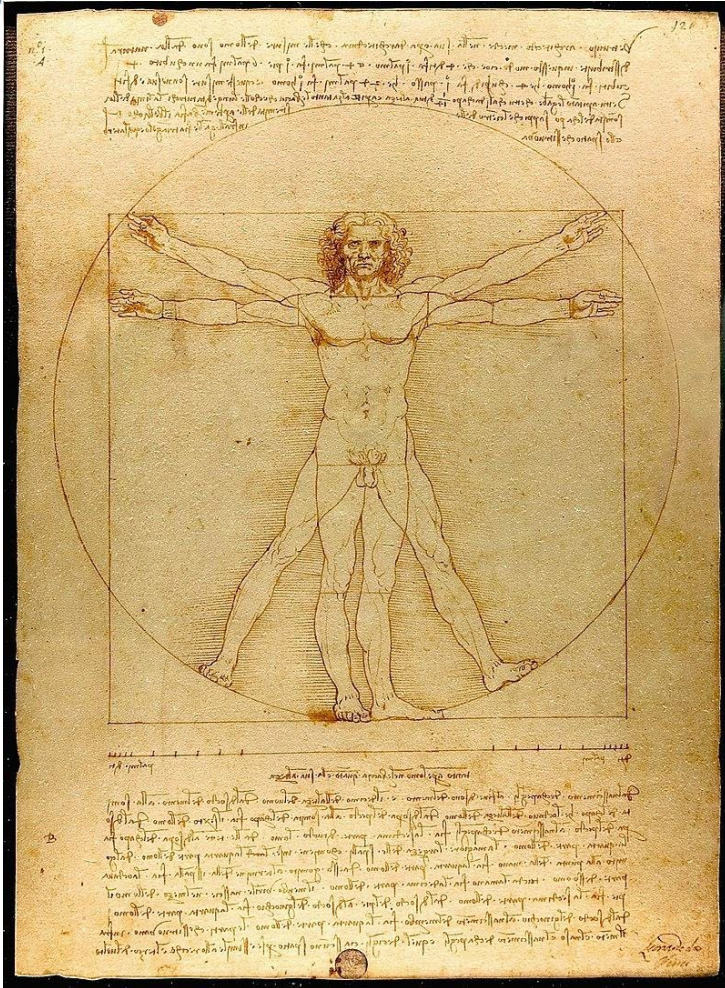
Non commetterete ingiustizie nei giudizi,  
nelle misure di lunghezza, nei pesi o  
nelle misure di capacità  
Avrete stadere giuste, pesi giusti,  
*efa* giusto, *hin* giusto.

[Levitico 19:35-36]

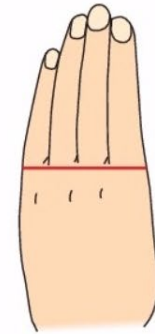
HIN misura di capacità per liquidi, EFA misura di capacità per aridi ....



# L'uomo è la misura di tutte le cose...

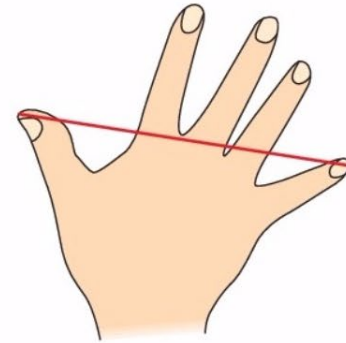


dito

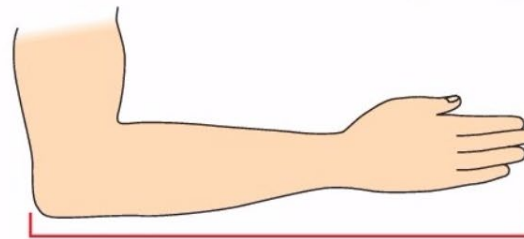


palmo

→ 4 dita



spanna

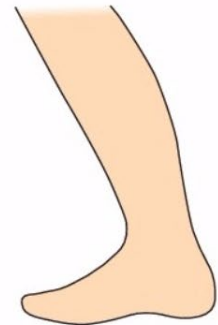


cubito

→ 7 palmi → 28 dita



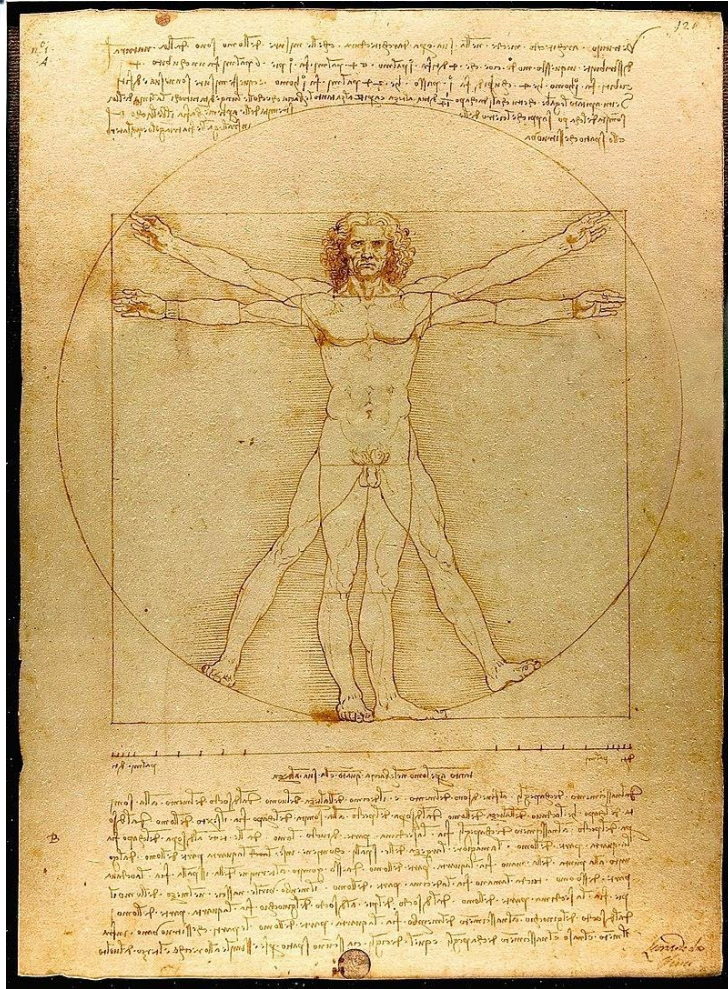
piede



passo



# Tutte le civiltà definiscono le unità di misura



Cubito Museo Egizio di Torino



# Psicostasia “la pesatura del cuore”





# La campana «magica»



[https://en.wikipedia.org/wiki/Bianzhong\\_of\\_Marquis\\_Yi\\_of\\_Zeng](https://en.wikipedia.org/wiki/Bianzhong_of_Marquis_Yi_of_Zeng)



# Dalla campana «magica» al flauto

*Dalla campana... al flauto... emettono la stessa nota caratteristica*

*La base per le lunghezze lineari è la canna del flauto*

*La lunghezza del flauto corrisponde a 90 fen*

*1 fen  $\equiv$  dimensione “media” di un grano di miglio nero*

*1200 grani di miglio nero riempiono la canna del flauto rappresentano il riferimento di massa*

*Le unità sono collegate ad una frequenza per mezzo di una nota...*



# 1789 Assemblea degli Stati Generali

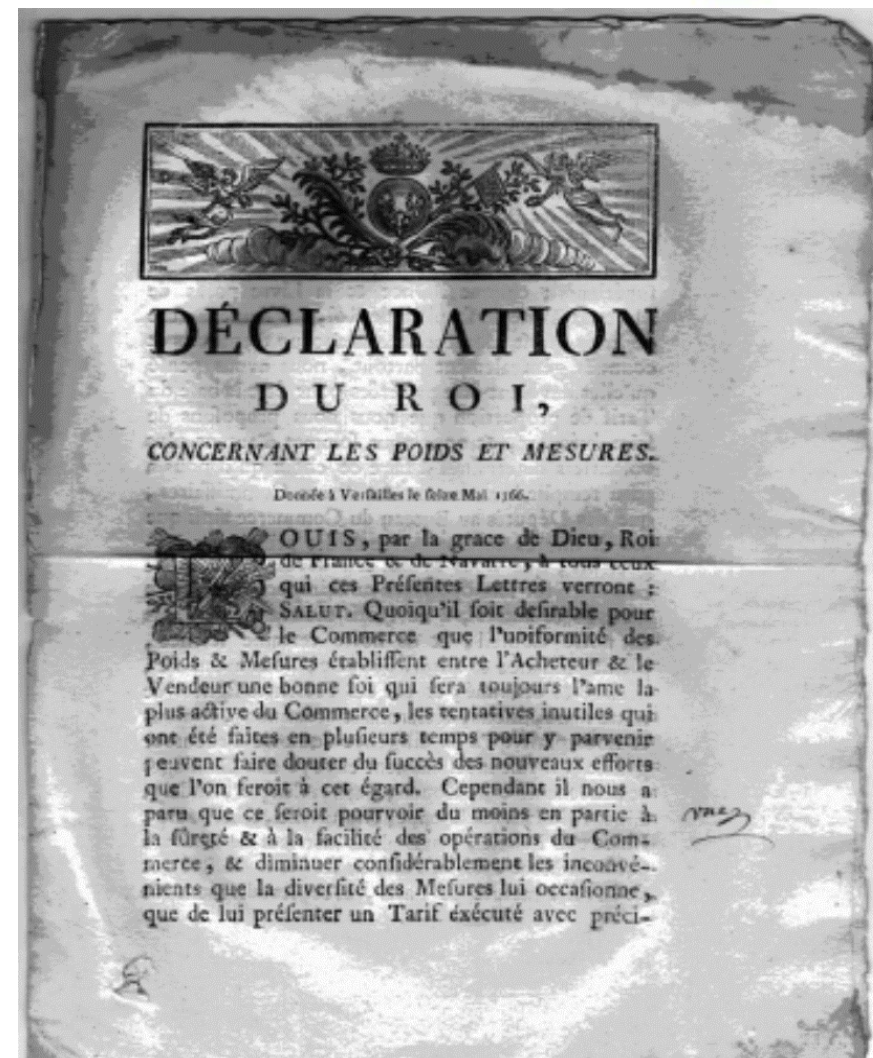


Auguste Couder, Public domain, via Wikimedia Commons



# «Alcune» mesure del piede in Francia

Longueur de quelques pieds de France.		Suite des Mesures pour les Aunages.	
	ligne. cence.		
Besançon, le pied est de	137 10	Canne.	Toulon. 859 60
Dijon.	139 20		Montpellier. 891 60
Dole.	150 30		Provence. 888 90
Grenoble.	151 20		Toulouse. 807 "
Lorraine.	127 "		Troyes. 351 70
Lyon.	151 50	Mesures rondes pour les choses sèches.	
Mâcon.	148 20	Aunes, Biches.	Lyon. Pouces cubes 9670
Paris.	144 "		Mâcon. 12893
Rouen.	120 "		Châlons-sur-Saône, 9283
Sedan.	123 "		Verdun. 9670
Strasbourg. { Pied de ville. 128 27			Amboise. 552
Strasbourg. { Pied de campagne. 130 90			Aurai. 1934
Vienne en Dauphiné. 143 "			Blois. 387
			Bordeaux. 3868
			Bourbon-Lancy. 573
			La Charité. 967
		Boissacans.	Charolles. 1221
			Châteauneuf-sous-Loire. 1105
			Cosne. 314
			Dieppe. 5157
			Havre-de-Grace. 1743
			Honfleur. 1976
			Montreuil. 430
			Morlaix. 2670
			Nevers. 967
			Paris. 614 1/2
		Aunes.	Périgueux. 1547
			Roanne. 967
			La Rochelle. 1658
			Rouen. 128
			Tours. 542
			Villeneuve d'Agénois. 4100
			Braine. 703
			Calors. 1469



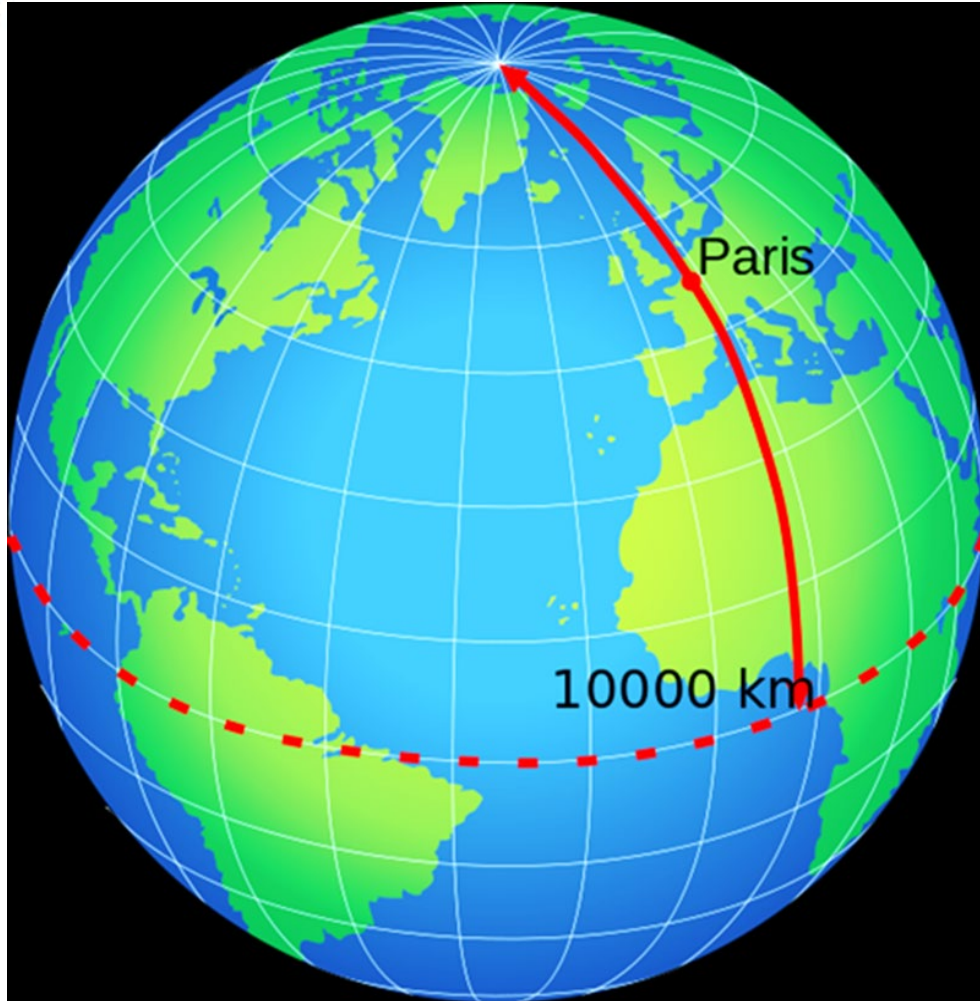


# L'Accademia Reale delle Scienze



Jean-Baptiste Colbert (1619-83) introduce i membri dell'Accademia Reale delle Scienze a Luigi XIV

# Il metro



L' Accademia Reale delle Scienze suggerisce la misura del meridiano terrestre per la definire la grandezza «lunghezza».

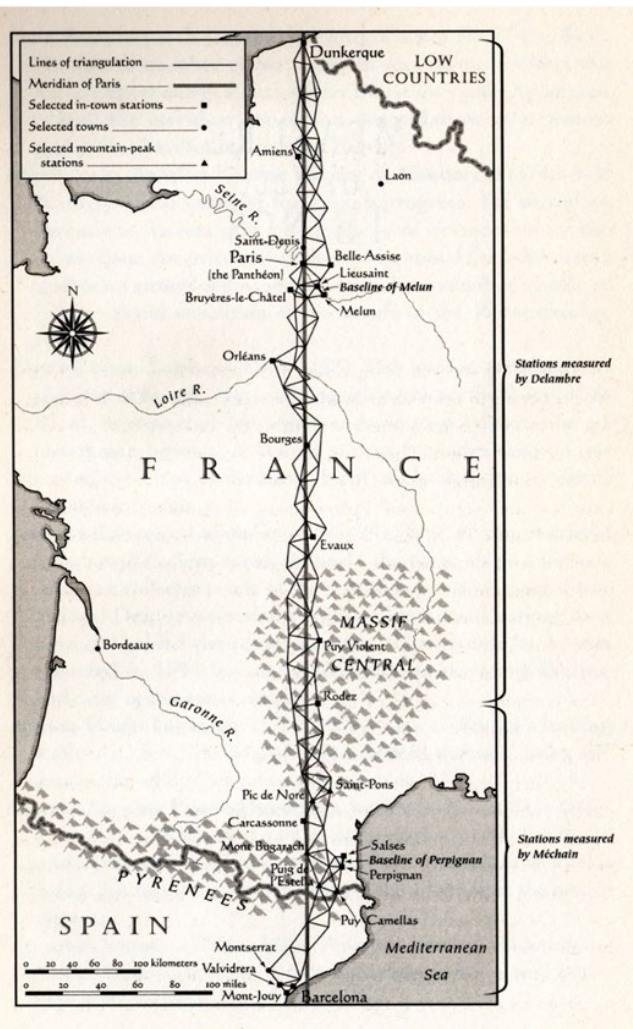
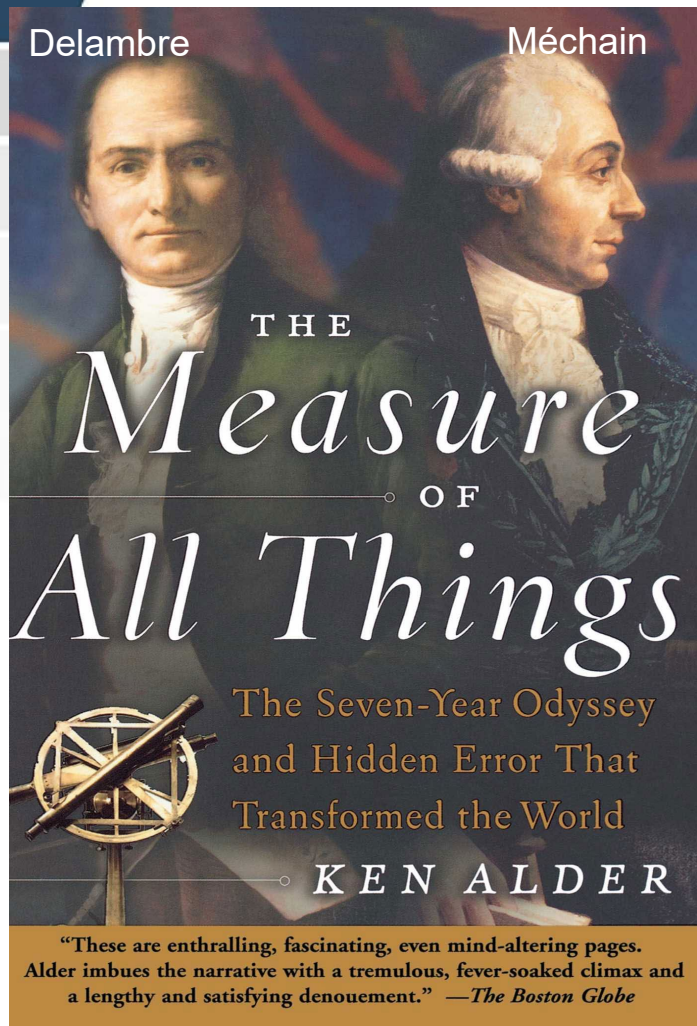
Il meridiano terrestre è universale, immutabile, per tutti i tempi e per tutti i popoli.

## Definizione:

*Il metro è definito come la decimilionesima parte del quarto di meridiano terrestre.*



# Il metro degli Archivi di Francia

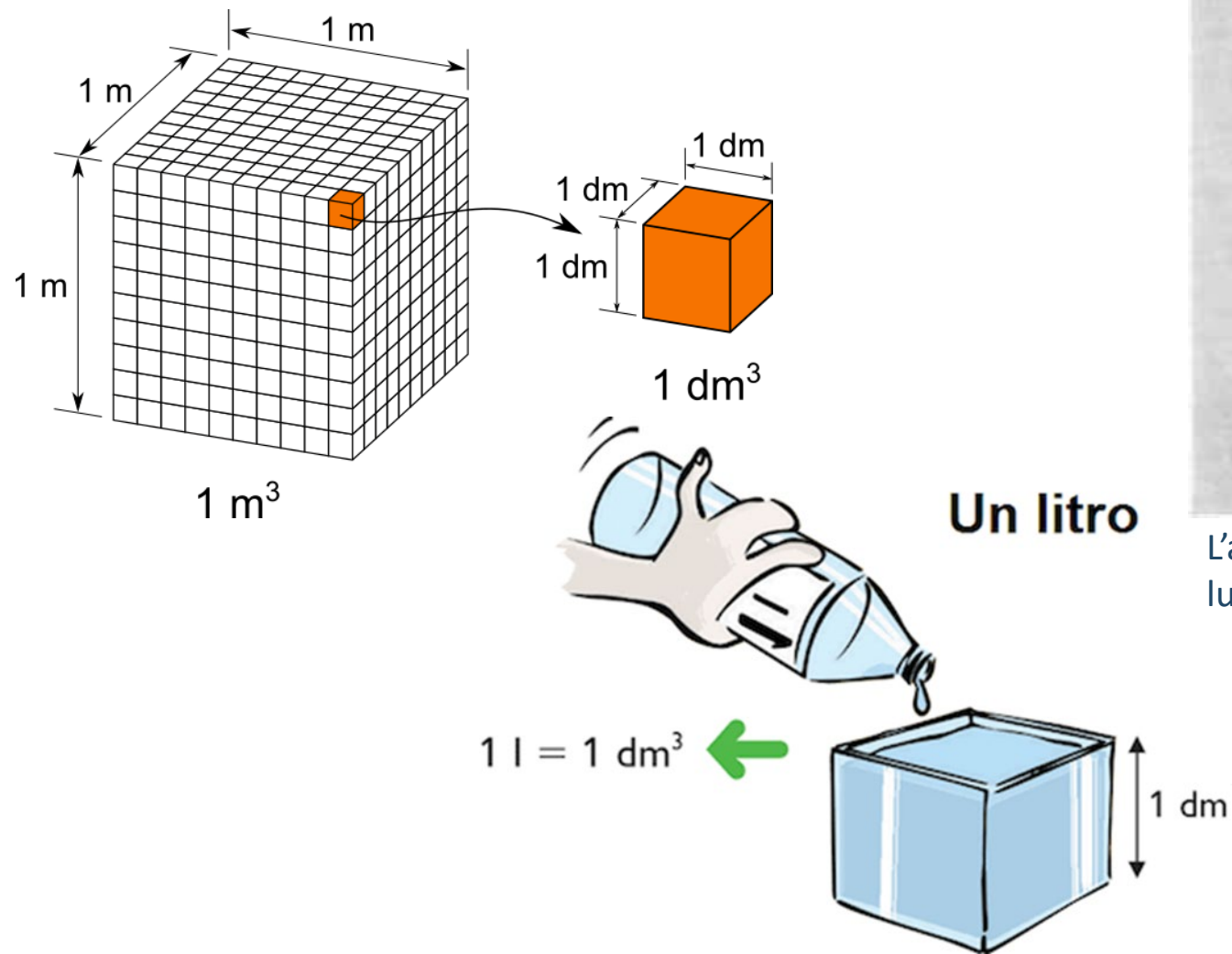


Copia del metro campione inserito nelle fondamenta di un palazzo di Parigi situato in 36 rue de Vaugirard.

Author Ken Eckert



# Il kilogrammo degli Archivi di Francia



L'articolo 5 della legge definisce cinque unità: lunghezza, superficie (terra), volumi solidi e liquidi, e la massa.



# La Convenzione del Metro – 20 Maggio 1875



L'Italia è tra i primi paesi firmatari della Convenzione del Metro

# La Convenzione del Metro – 20 Maggio 1875

La Convenzione del Metro (Convention du Mètre) è un trattato internazionale che ha istituito:

## Conferenza Generale dei Pesi e delle Misure (CGPM)

La CGPM è costituita dai Delegati degli Stati Membri e dagli Osservatori degli Stati Associati

La CGPM si riunisce a Parigi generalmente ogni quattro anni.

## Comitato Internazionale dei Pesi e delle Misure (CIPM)

Il compito del CIPM è quello di promuovere il SI attraverso azioni dirette e sottopone alla CGPM le proposte delle risoluzioni da adottare alla Conferenza Generale (CGPM).

Il CIPM si avvale di dieci Comitati Consultivi (e.g. CCM per la Massa e le Grandezze Apparentate)

Il CIPM si riunisce ogni anno (dal 2011 due sessioni per anno)

## Ufficio Internazionale dei Pesi e delle Misure (BIPM)

Il BIPM è un'organizzazione internazionale stabilito dalla Convenzione del Metro attraverso cui gli Stati Membri si confrontano sulle materie inerenti la scienza della misura e gli standard.

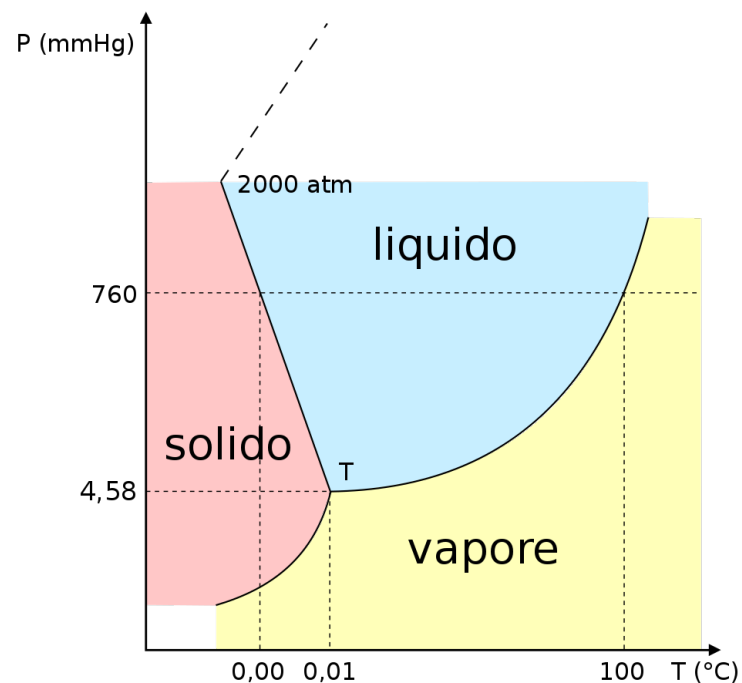


# Anno 1960 - nascita del SI



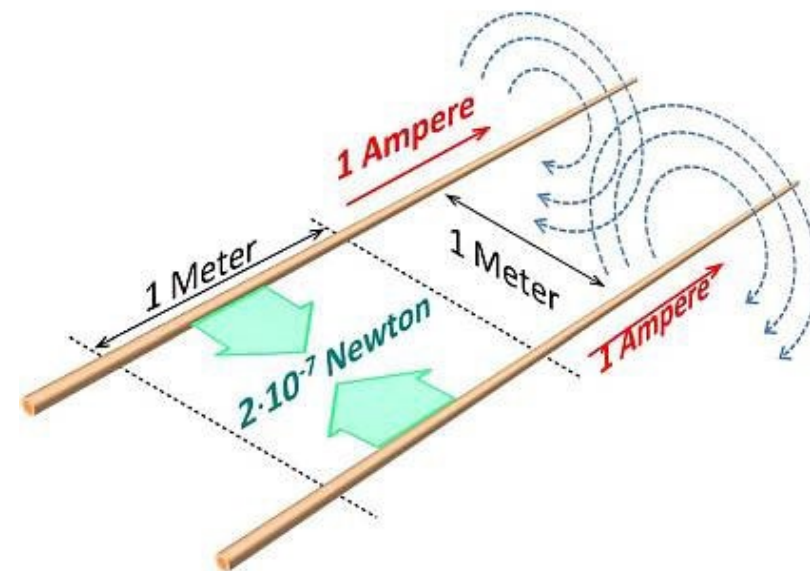
**Il kilogrammo**

**un artefatto**



**Il kelvin**

**una proprietà  
della materia**



**L'ampere**

**un esperimento  
ideale**

# 1960 nasce il Sistema Internazionale... e cresce

1960 - sei unità di base (m, kg, s, A, K, cd);

1967 - il tempo viene ridefinito su transizione atomica;

1971 - introdotta una nuova unità “la mole”;

1979 - la candela è ridefinita come radiazione monocromatica;

1983 - il metro è definito mediante la velocità della luce in vuoto;

1990 – introdotte le unità elettriche convenzionali per il volt e l’ohm  
e la scala temperatura ITS-90.



Il Sistema Internazionale è in continua evoluzione...



# XXVI Conferenza Generale dei Pesi e delle Misure

On the revision of the International System of Units (SI)

... the International System of Units, the SI, is the system of units in which:

the unperturbed ground state [...] of the  $^{133}\text{Cs}$  atom,  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$  is  $9\,192\,631\,770$

the speed of light in vacuum  $c$  is  $299\,792\,458$  m/s

the Planck constant  $h$  is  $6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$  J s

the elementary charge  $e$  is  $1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$  C

the Boltzmann constant  $k$  is  $1.380\,650\,4 \times 10^{-23}$  J/K

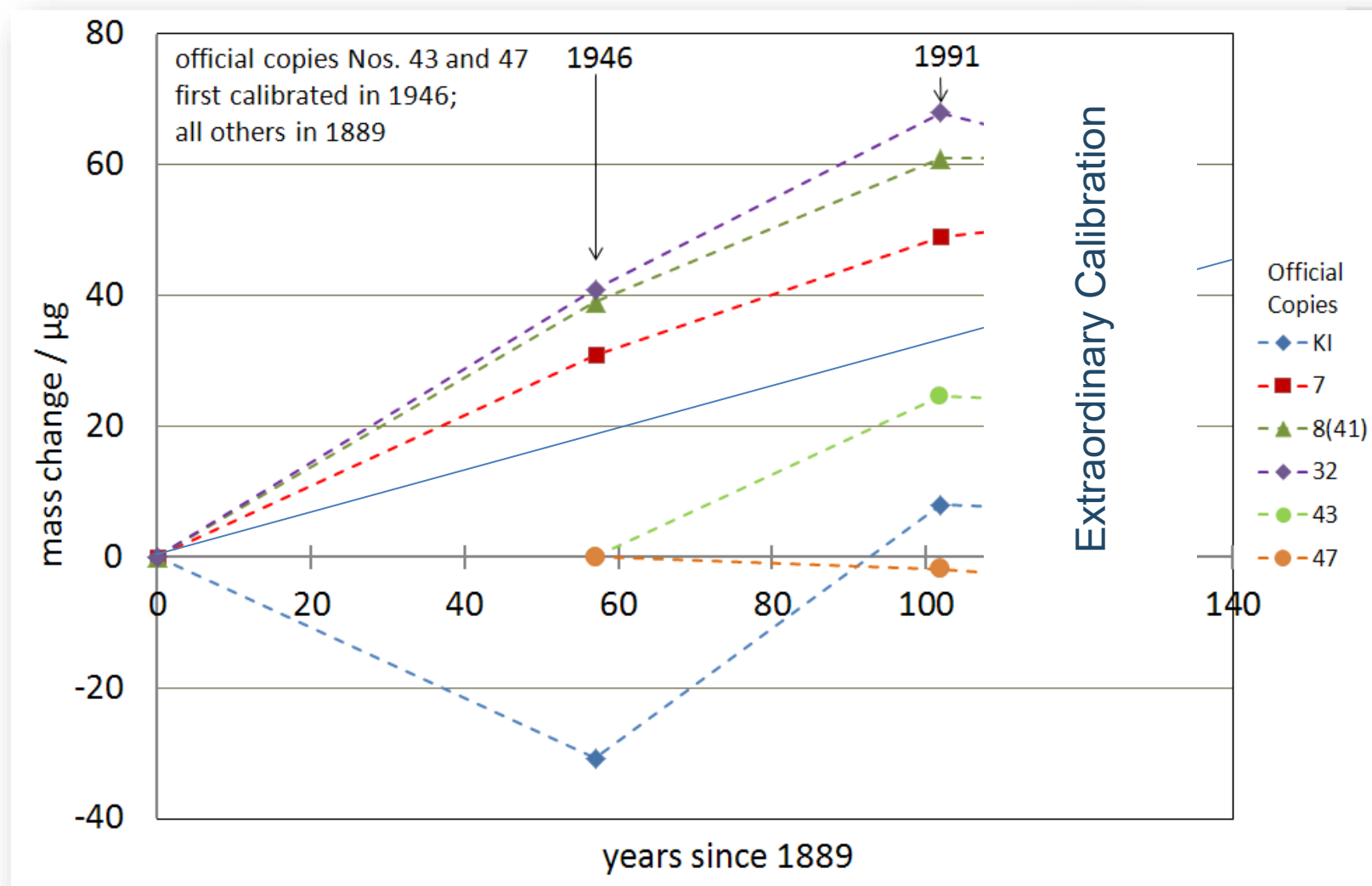
the Avogadro constant  $N_A$  is  $6.022\,140\,76 \times 10^{23}$  mol $^{-1}$

the luminous efficacy  $K_{\text{cd}}$  is  $683$  lm/W

perché si definisce un nuovo SI basato su costanti fondamentali?



# Il prototipo internazionale del kilogrammo - IPK





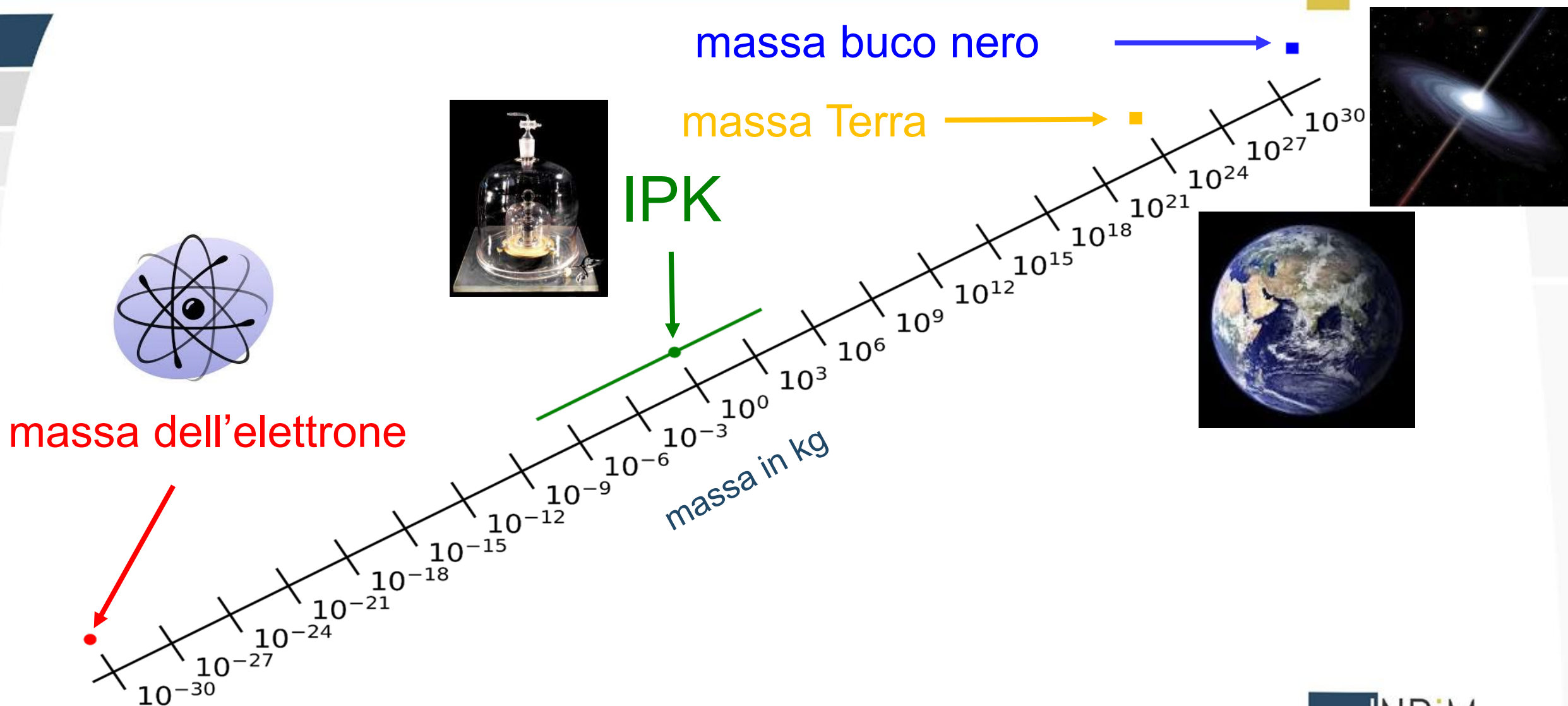
# Limiti del prototipo internazionale - IPK

Il prototipo internazionale del kilogrammo era un artefatto che non era connesso ad un'invariante della natura.

Alcune riflessioni....

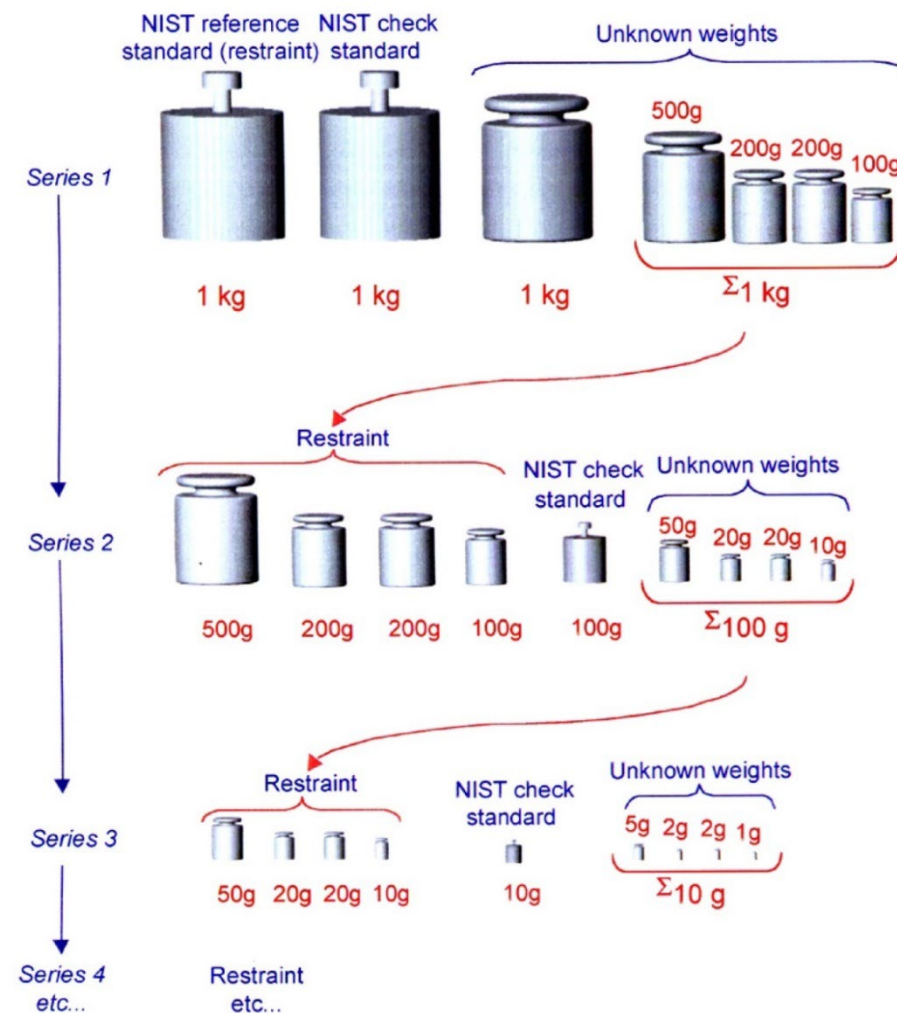
- I) può essere danneggiato o distrutto;
- II) contemporaneamente è definizione e realizzazione;
- III) accumula sporcizia e particelle dall'ambiente;
- IV) prima di essere utilizzato IPK deve essere “lavato”;
- V) non può essere utilizzato intensamente;
- VI) accessibile solo al BIPM;
- VII) ...

# L'estensione della scala di massa

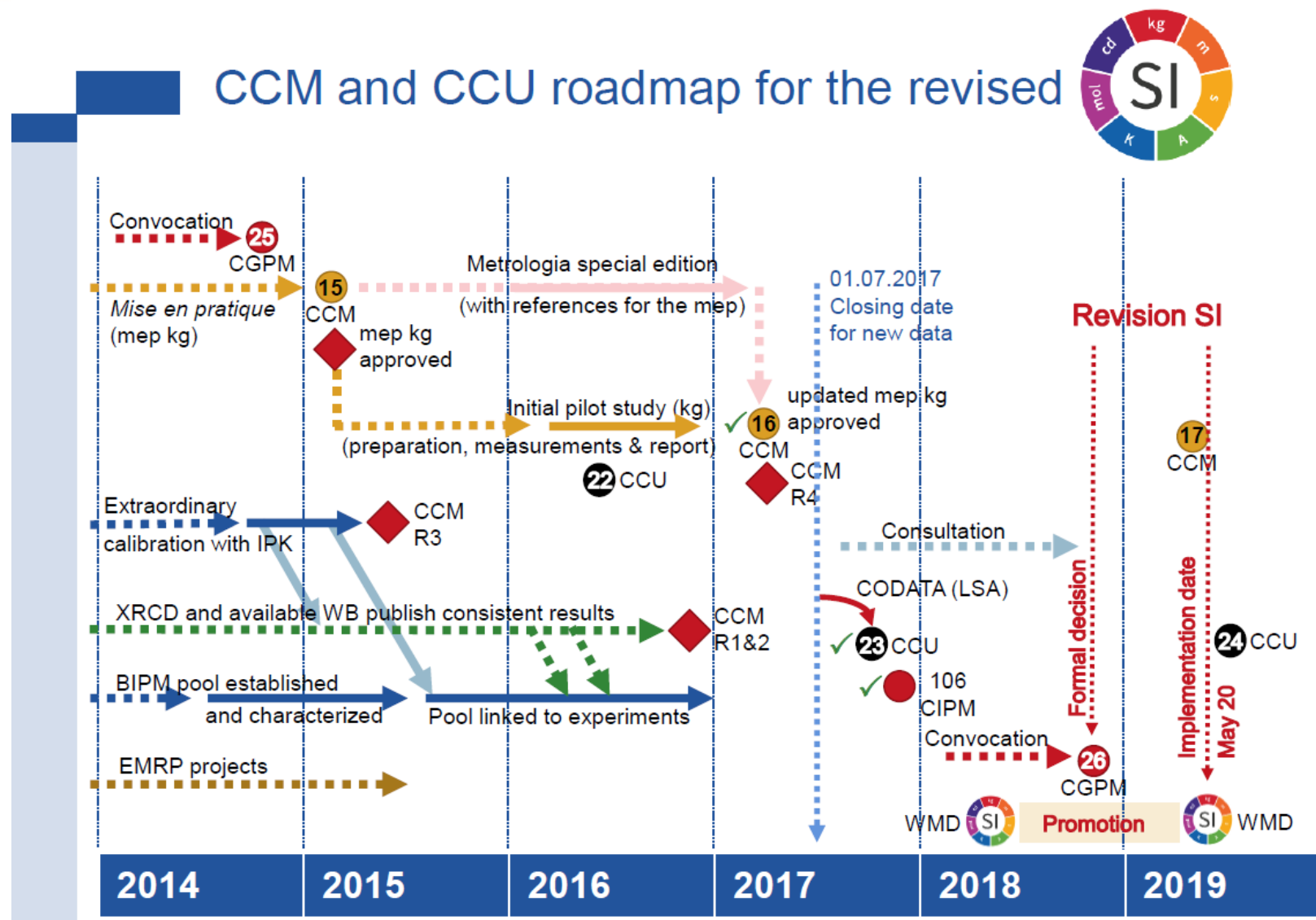




# La «costruzione» della scala di massa



# Il percorso per la ridefinizione del kg





# Il progetto Avogadro e la bilancia di Kibble



# Nature 200, pages 61–62 (1963)

MENU ▾

**nature**  
International journal of science

Letter | Published: 05 October 1963

## Phantasies on a Natural Unity of Mass

C. EGIDI

Nature 200, 61–62 (1963) | [Download Citation](#) ↓

**i** An Erratum to this article was published on 21 March 1964

### Abstract

THE 'artificial' unity of mass has not been solved for more than half a century and its substitution by a 'natural unity' cannot be considered as forthcoming.

From this moment onwards we can say: "The kg is the mass of  $K$  atoms of . . .". The numerical count of the atoms will also give a highly accurate value for the Avogadro's number  $N$ , the knowledge of which—so far as is known—is now limited to one pair of parts in  $10^5$ .



## A Neo-Pythagorean Approach Towards an Atomic-Mass Standard.

G. ZOSI

*Istituto di Metrologia « G. Colonnetti » - Torino, Italia*

(ricevuto il 12 Ottobre 1983)

PACS. 06.20. – Metrology.

*Summary.* – Avogadro's constant,  $N_A$ , is usually considered an obligatory passage for a new definition of the unit of mass, the kilogram, though the uncertainty with which  $N_A$  is known at present does not allow us to expect either a new definition of the unit or the substitution for the Pt-Ir standard maintained at Sèvres to occur in the near future. The alternative we propose is based on an algorithm, by which the unit of mass can be defined and materialized by a standard represented by a silicon sphere containing a countable number of atoms. To ensure continuity with the present system, the mass of the sphere should differ from the mass of the Pt-Ir standard by less than a few micrograms. The present proposal, too, cannot be expected to become concrete in a short time; on the other hand, by applying the algorithm in question, density measurements are not required and mass differences can be determined by counting the atoms present in individual objects with an uncertainty lower than the present one.

## Redefinition of the kilogram: a decision whose time has come

Ian M Mills<sup>1</sup>, Peter J Mohr<sup>2</sup>, Terry J Quinn<sup>3</sup>, Barry N Taylor<sup>2</sup> and Edwin R Williams<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Chemistry, University of Reading, Reading, RG6 6AD, UK

<sup>2</sup> National Institute of Standards and Technology, 100 Bureau Drive, Gaithersburg, MD 20899, USA

<sup>3</sup> Emeritus Director, Bureau International des Poids et Mesures, Pavillon de Breteuil, F-92312 Sèvres, Cedex, France

E-mail: i.m.mills@reading.ac.uk, mohr@nist.gov, terry.quinn@physics.org, barry.taylor@nist.gov and edwin.williams@nist.gov

### Abstract

The kilogram, the base unit of mass in the International System of Units (SI), is defined as the mass  $m(\mathcal{K})$  of the international prototype of the kilogram. Clearly, this definition has the effect of fixing the value of  $m(\mathcal{K})$  to be one kilogram exactly. In this paper, we review the benefits that would accrue if the kilogram were redefined so as to fix the value of either the Planck constant  $h$  or the Avogadro constant  $N_A$  instead of  $m(\mathcal{K})$ , without waiting for the experiments to determine  $h$  or  $N_A$  currently underway to reach their desired relative standard uncertainty of about  $10^{-8}$ . A significant reduction in the uncertainties of the SI values of many other fundamental constants would result from either of these new definitions, at the expense of making the mass  $m(\mathcal{K})$  of the international prototype a quantity whose value would have to be determined by experiment. However, by assigning a conventional value to  $m(\mathcal{K})$ , the present highly precise worldwide uniformity of mass standards could still be retained. The advantages of redefining the kilogram immediately outweigh any apparent disadvantages, and we review the alternative forms that a new definition might take.



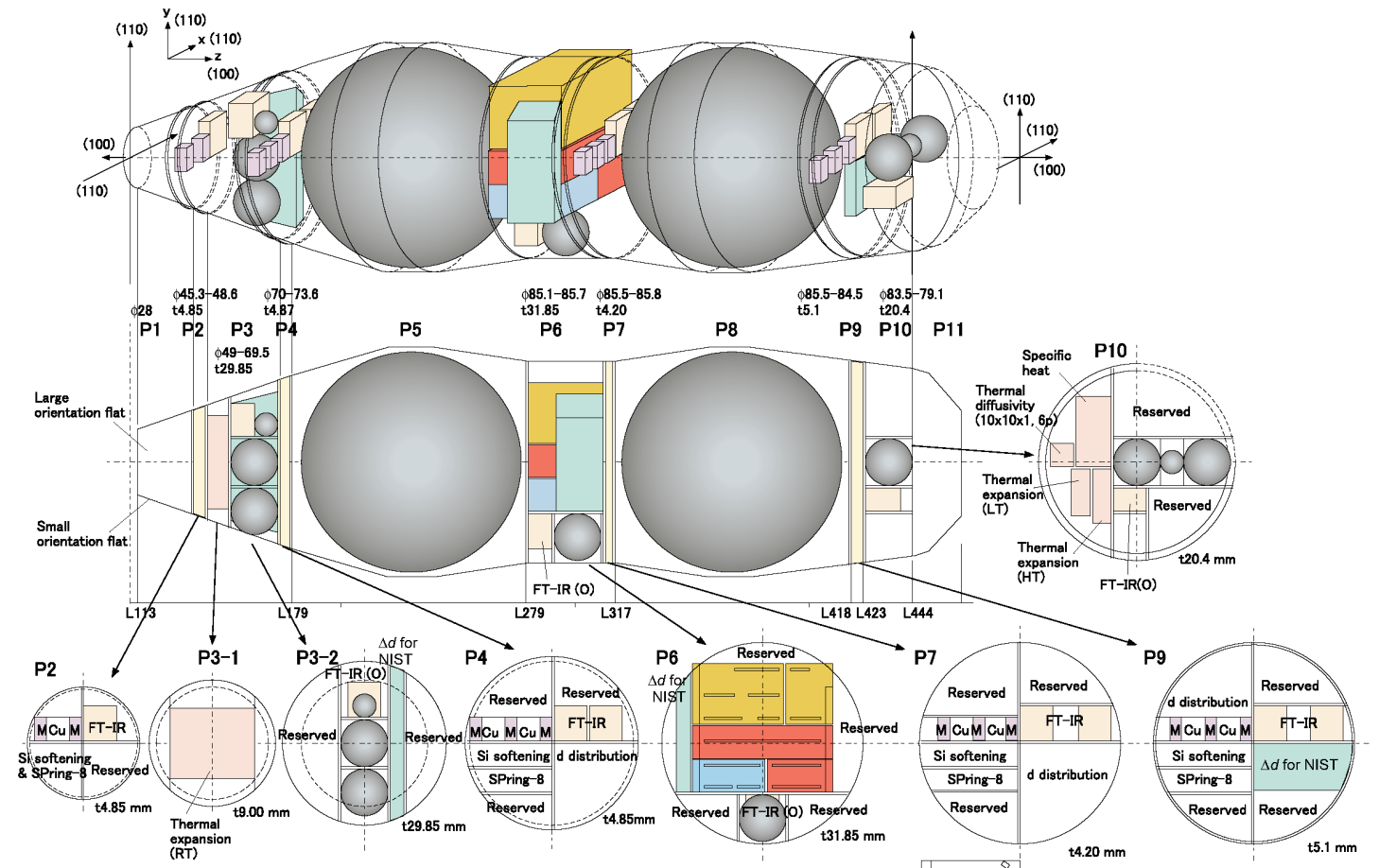
# IAC - International Avogadro Coordination



# IAC - International Avogadro Coordination



Cutting plan of silicon-28 ingot (Ver. 6d)

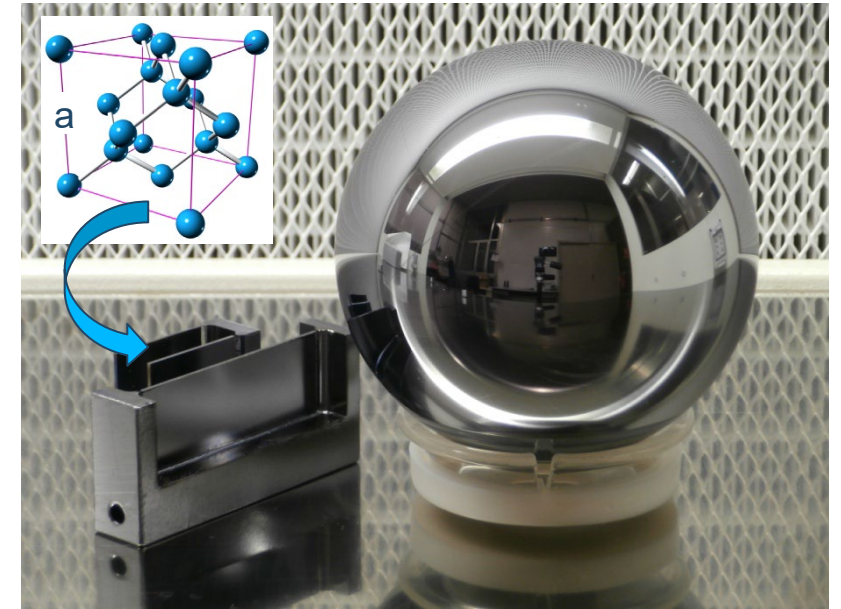




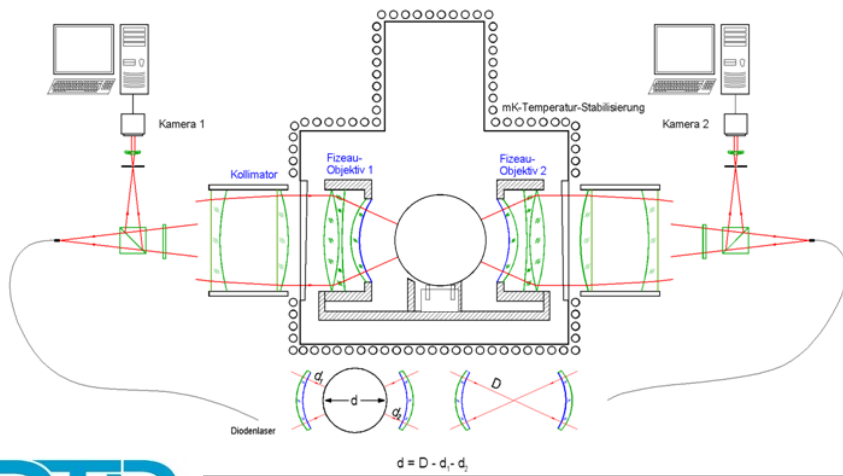
# Il progetto Avogadro - la determinazione di $N_A$

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

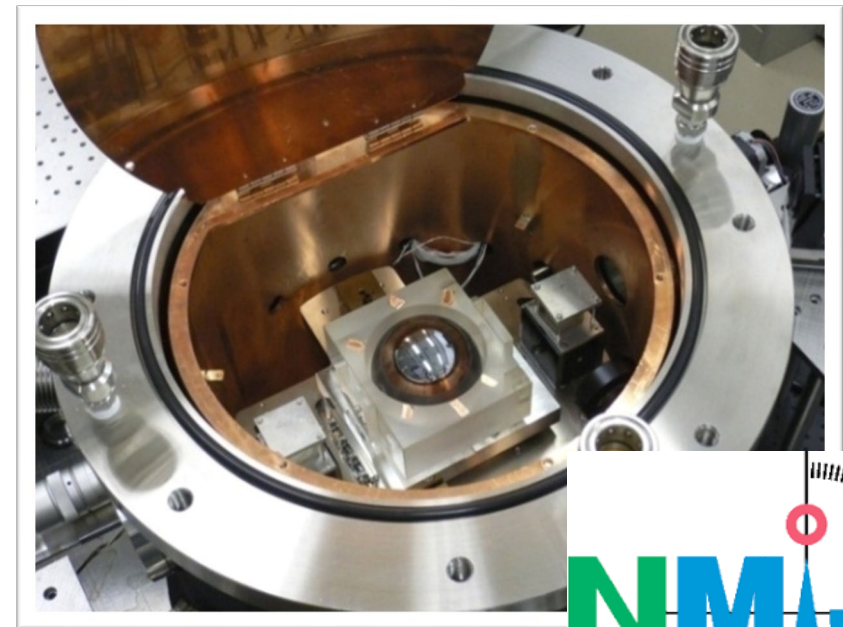
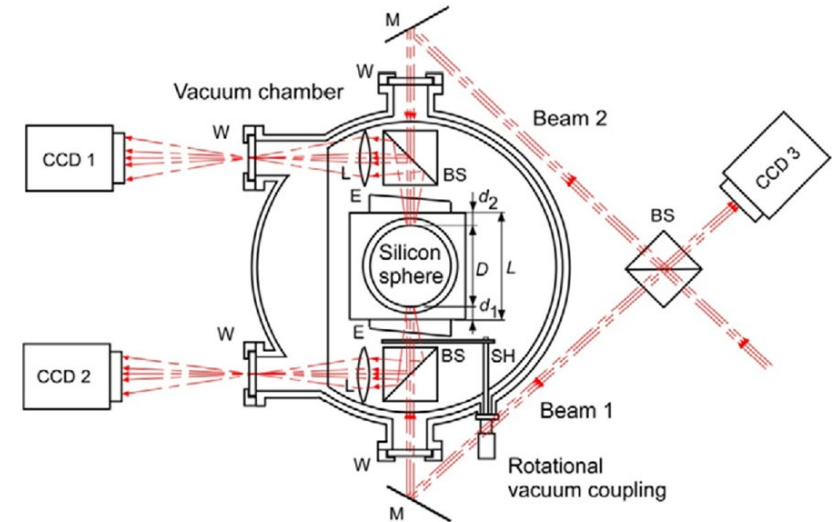
$M$  massa molare;  
 $\rho_m$  densità media;  
 $a^3$  volume della cella elementare;  
8 numero di atomi per cella elementare;



# Il diametro e il volume della sfera

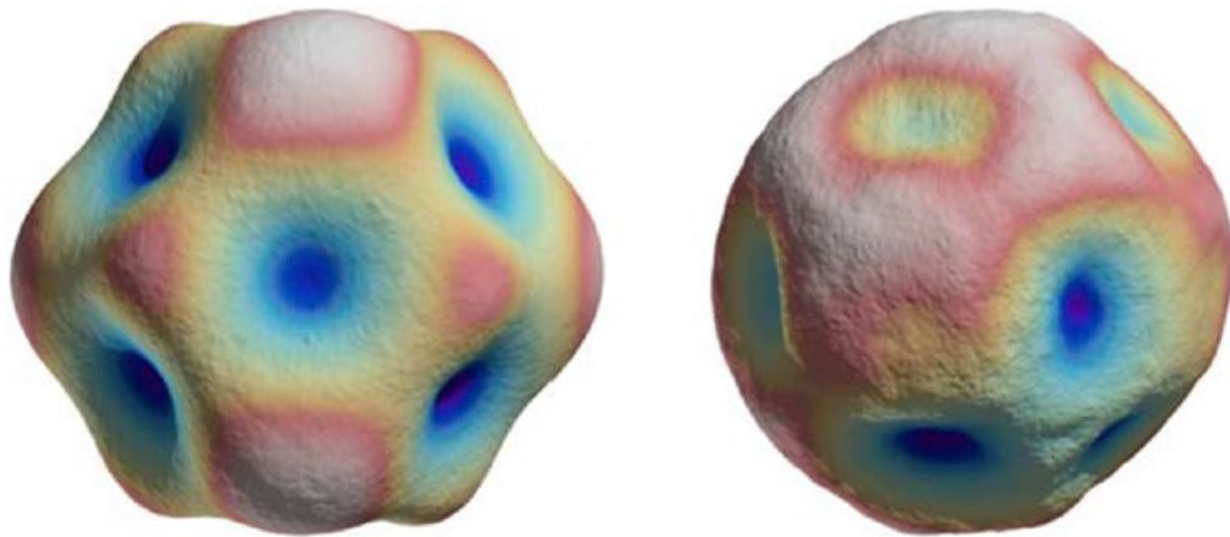


Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Braunschweig und Berlin



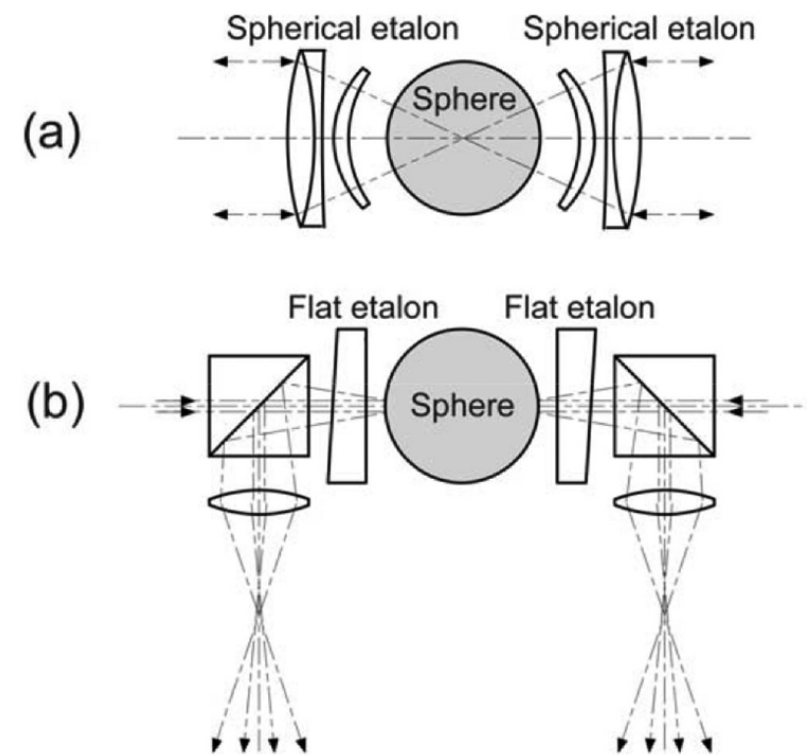


# Il diametro e il volume della sfera



Topografia delle sfere in  $^{28}\text{Si}$ :

AVO28-S5c (SX,  $(p-v)$  diametro = 69 nm);  
AVO28-S8c (DX,  $(p-v)$  diametro = 38 nm),  
 $(p-v)$  differenza di diametro tra il MAX e il MIN.

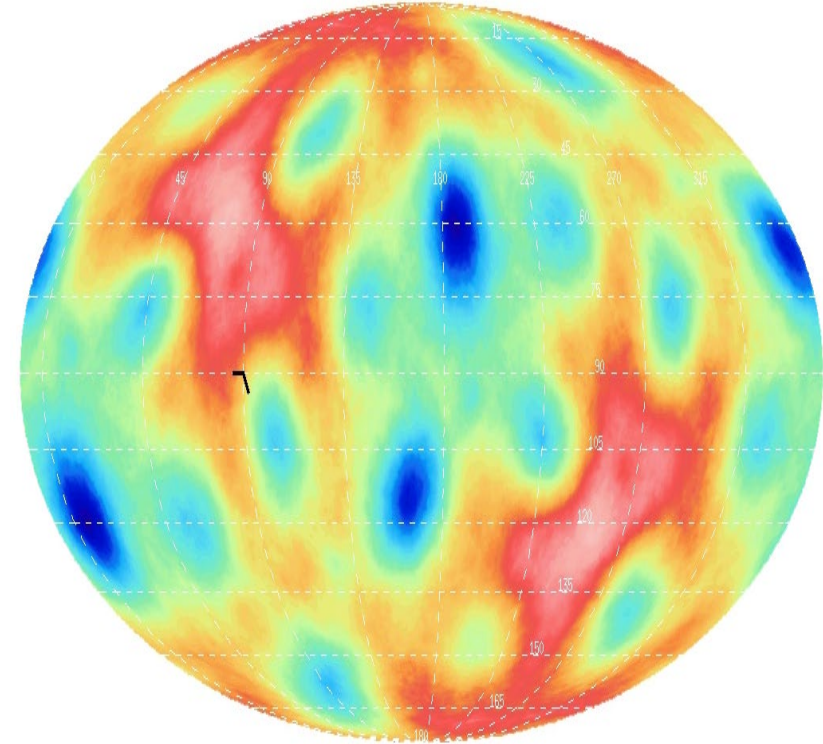


$$D_{\text{core}} = D_{\text{apparent}} - \Delta d - 2d_{\text{SL}}$$

# Terra vs Sfera – un confronto

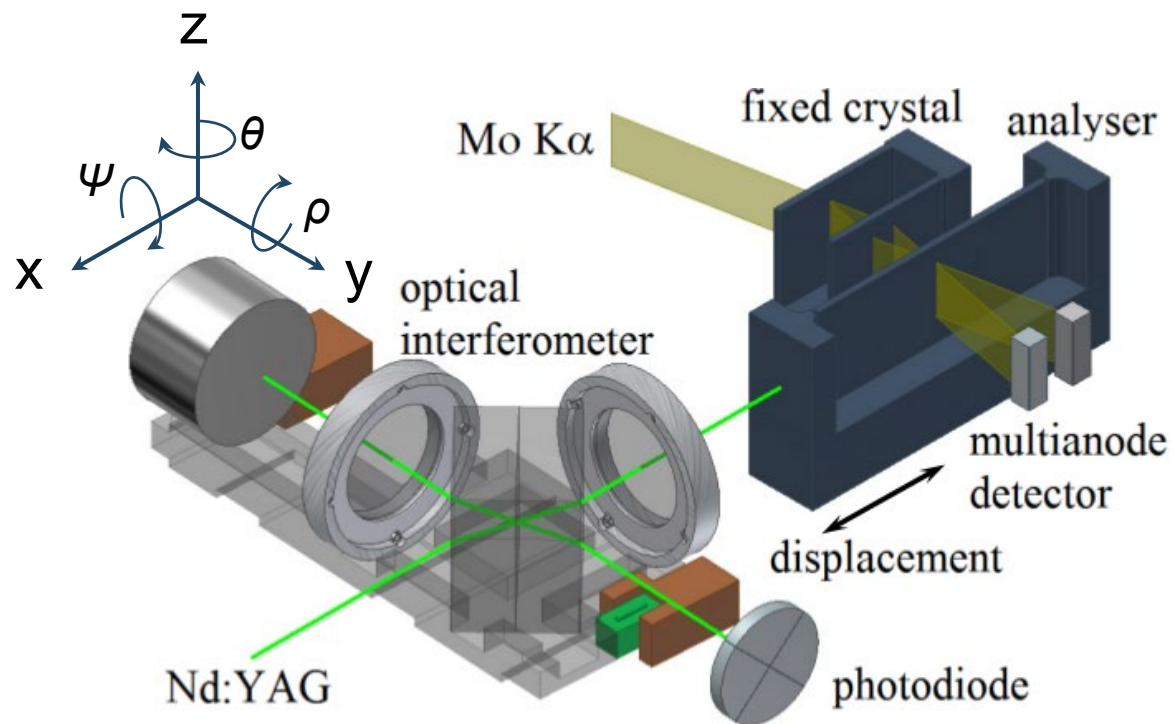


$(p-v)$  diametro  $\approx 20$  km  
diametro  $\approx 12.600$  km



$(p-v)$  diametro  $\approx 69$  nm  
diametro  $\approx 93700000$  nm

# Il volume della cella elementare



$\rho, \vartheta$	nrad
$\psi$	$\mu$ rad
x	pm
y, z	nm (frazioni di )

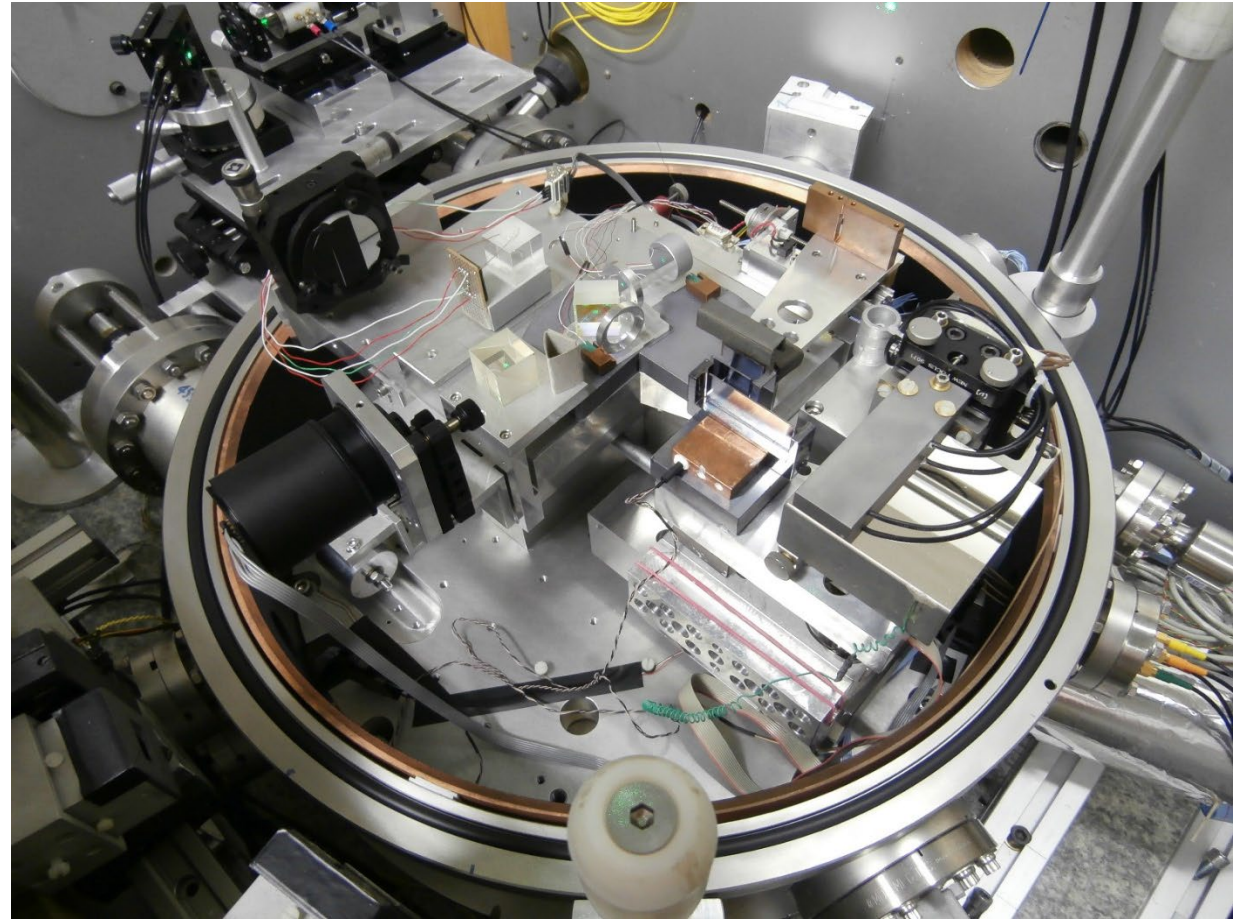
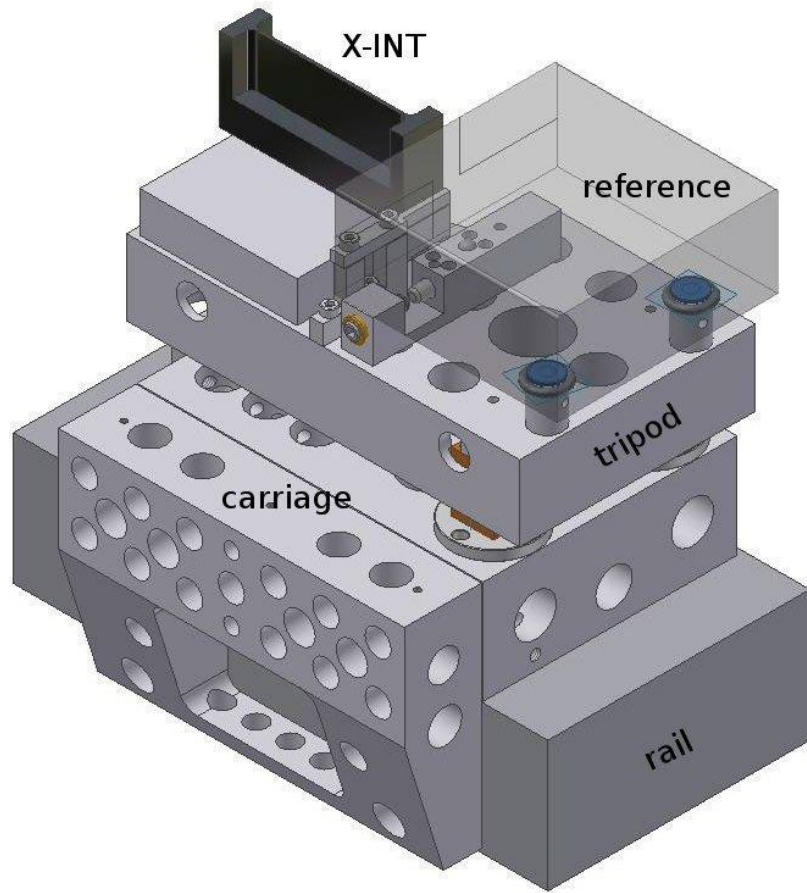
Controlli attivi sui tre gradi di libertà meccanici

Beccheggio ( $\rho$ ), Imbardata ( $\vartheta$ ) e spostamento x - interferometria ottica;

Rollio ( $\psi$ ) e traslazioni z-y – tecnica capacitiva;



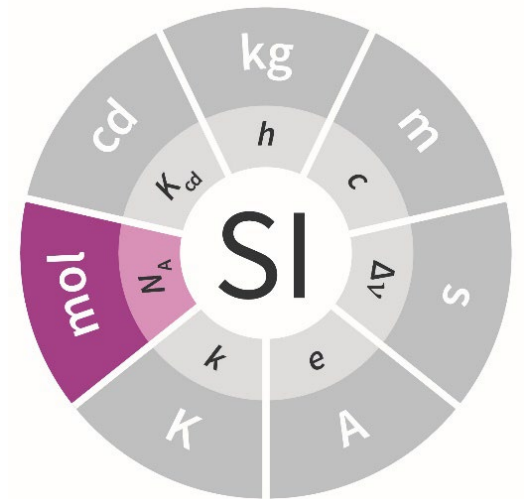
# Il volume della cella elementare



# La mole

Una mole contiene esattamente  $6.022\,140\,76 \times 10^{23}$  entità elementari. Questo numero corrisponde al valore numerico esatto della costante di Avogadro  $N_A$ , espresso in  $\text{mol}^{-1}$ , ed è chiamato numero di Avogadro.

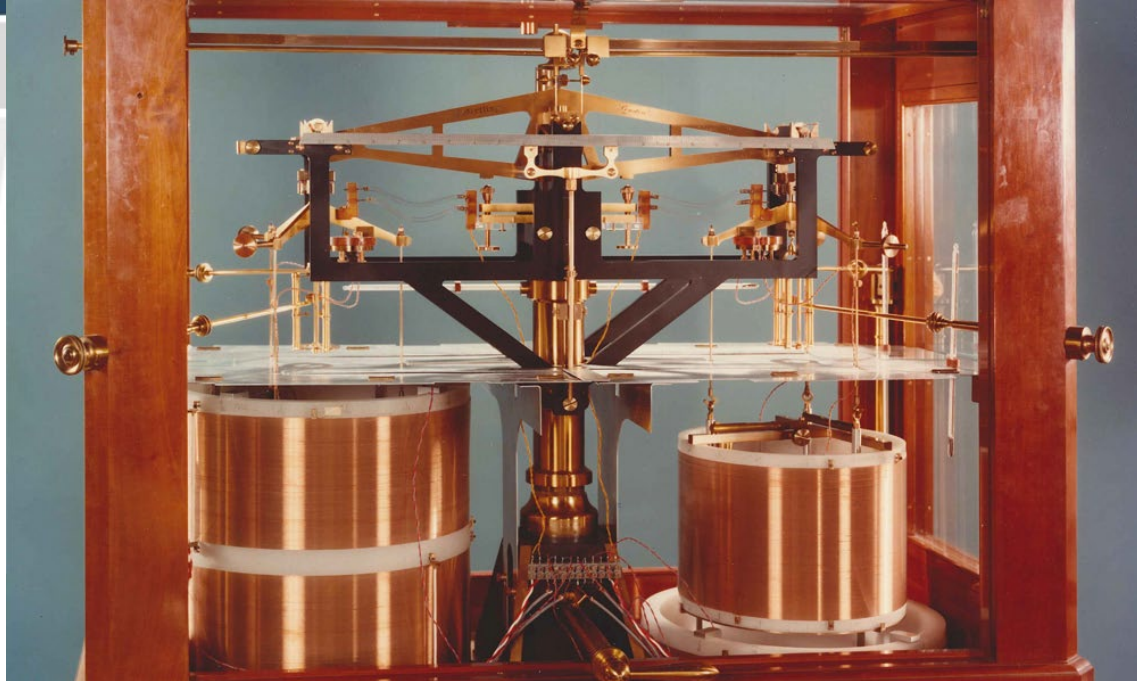
$$1 \text{ mol} = \left( \frac{6.022\,140\,76 \times 10^{23}}{N_A} \right)$$



Le entità elementari possono essere atomi, molecole, ioni, elettroni...

602 214 076 000 000 000 000 «entità elementari»

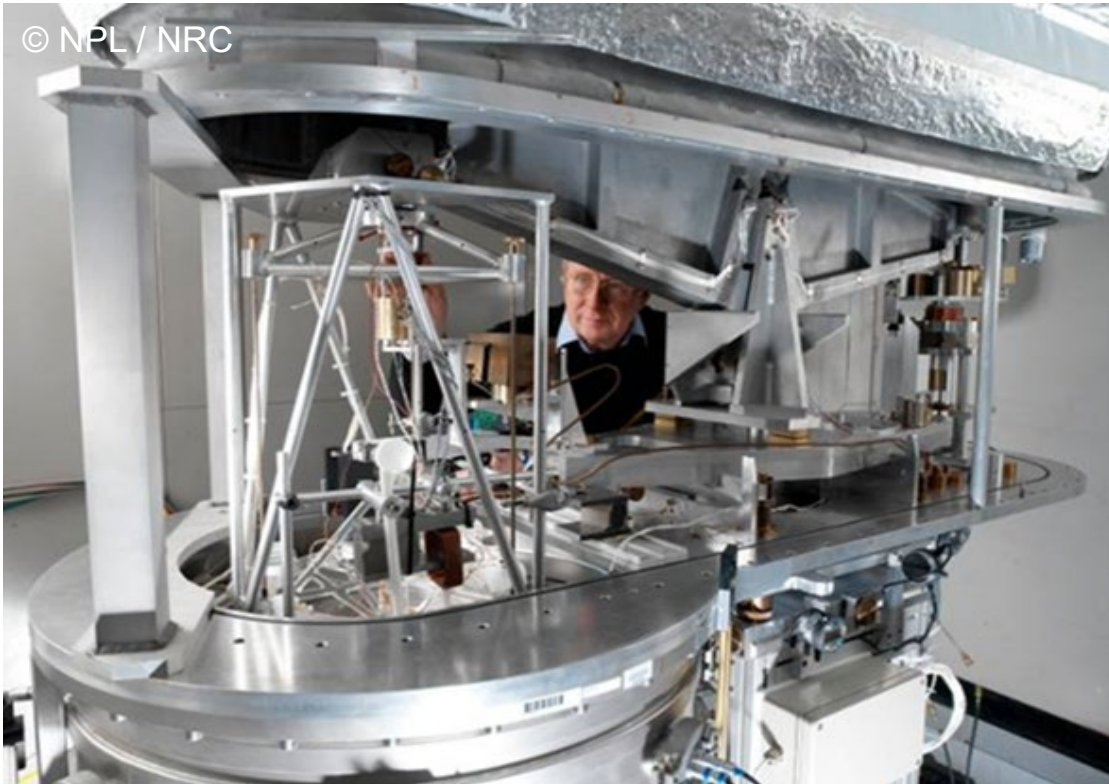
# La bilancia di Kibble - la determinazione di $h$



- La bilancia di Kibble (definita del watt fino al 2016) è stata inventata da Bryan Kibble nel 1975 al National Physical Laboratory – UK per realizzare in modo semplice l'ampere.
- La prima bilancia di corrente aveva una incertezza di  $\sim 10$  ppm, denominata Mk I e ha funzionato tra il 1976 e il 1988.
- I risultati sperimentali hanno contribuito a fissare nel 1990 il valore convenzionale della costante di Josephson  $K_{J-90}$ , separando le grandezze elettriche dal SI.



# La bilancia di Kibble - la determinazione di $h$

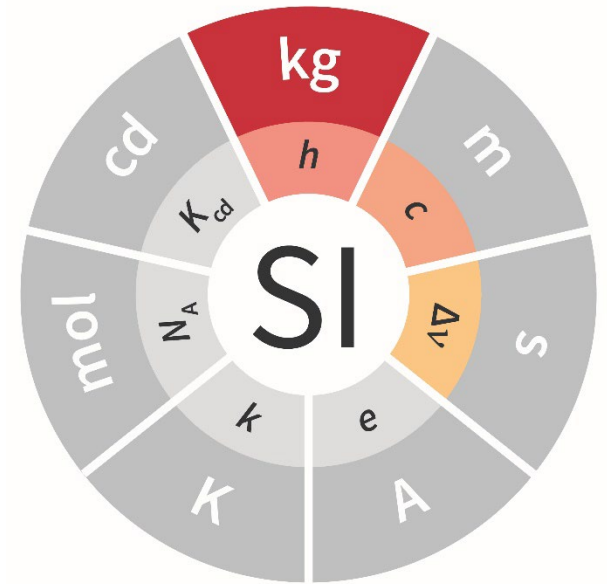


La bilancia di Kibble permetteva di determinare la costante di Planck  $h$  attraverso un bilancio di “*potenza virtuale*” tra una potenza meccanica espressa in termini di **lunghezza**, **massa** e **tempo** e una potenza elettrica espressa in termini di **tensione** e **resistenza** utilizzando le costanti elettriche Josephson e quantum Hall.

# Il kilogrammo

Il kilogrammo, simbolo kg, è l'unità di massa nel SI. Il kilogrammo è definito dal valore numerico esatto della costante di Planck  $h$ , pari a  $6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$ , quando espressa in J s (che equivale a  $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$ ), dove il metro e il secondo sono espressi in termini di  $c$  e  $\Delta \nu_{\text{Cs}}$

$$1 \text{ kg} = \left( \frac{h}{6.626\,070\,15 \times 10^{-34}} \right) \text{m}^{-2} \text{s}$$



# Approfondimento rivista IOP - Metrologia



OPEN ACCESS  
IOP - Metrologia

2011

International determination of the  
Avogadro constant

2014

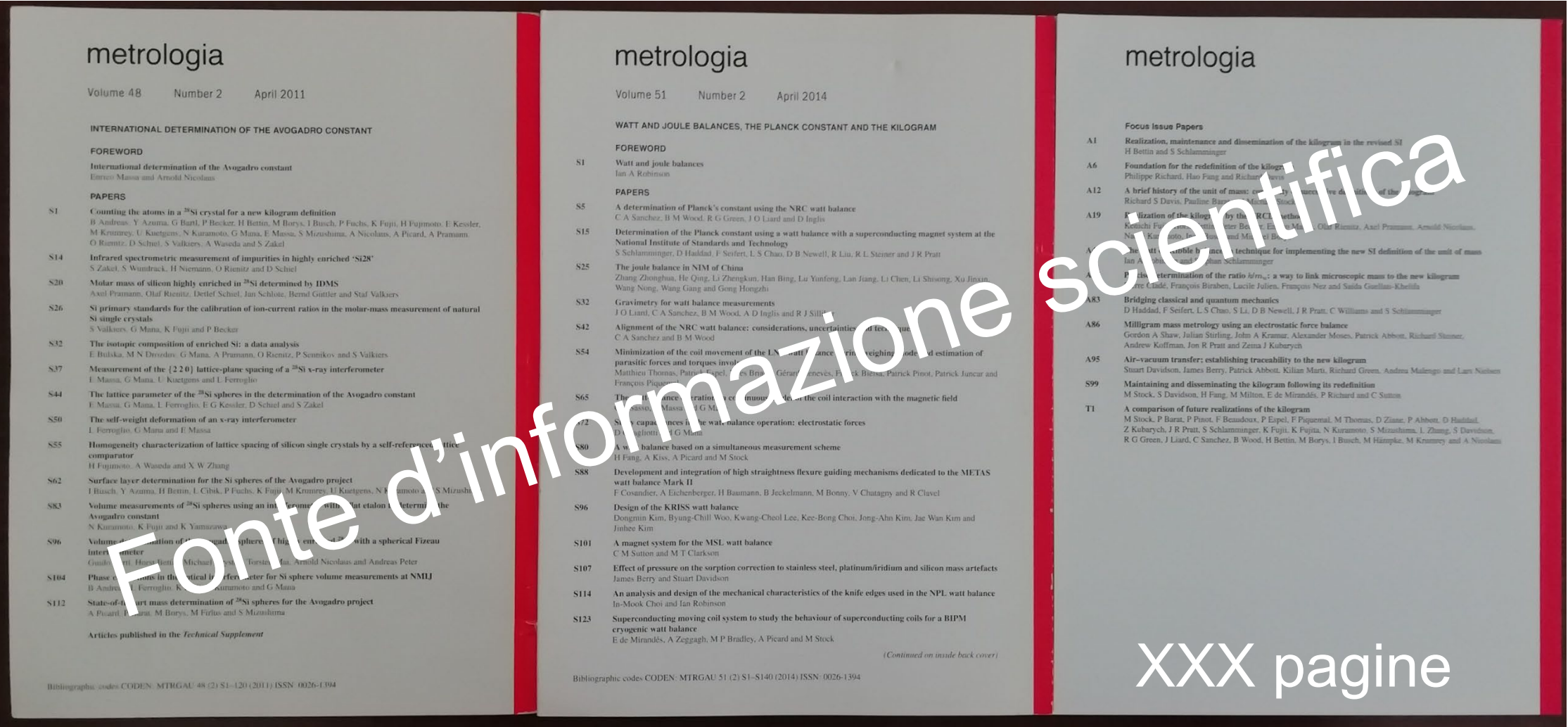
Watt and joule balances, the Planck  
constant and the kilogram

2016-2018

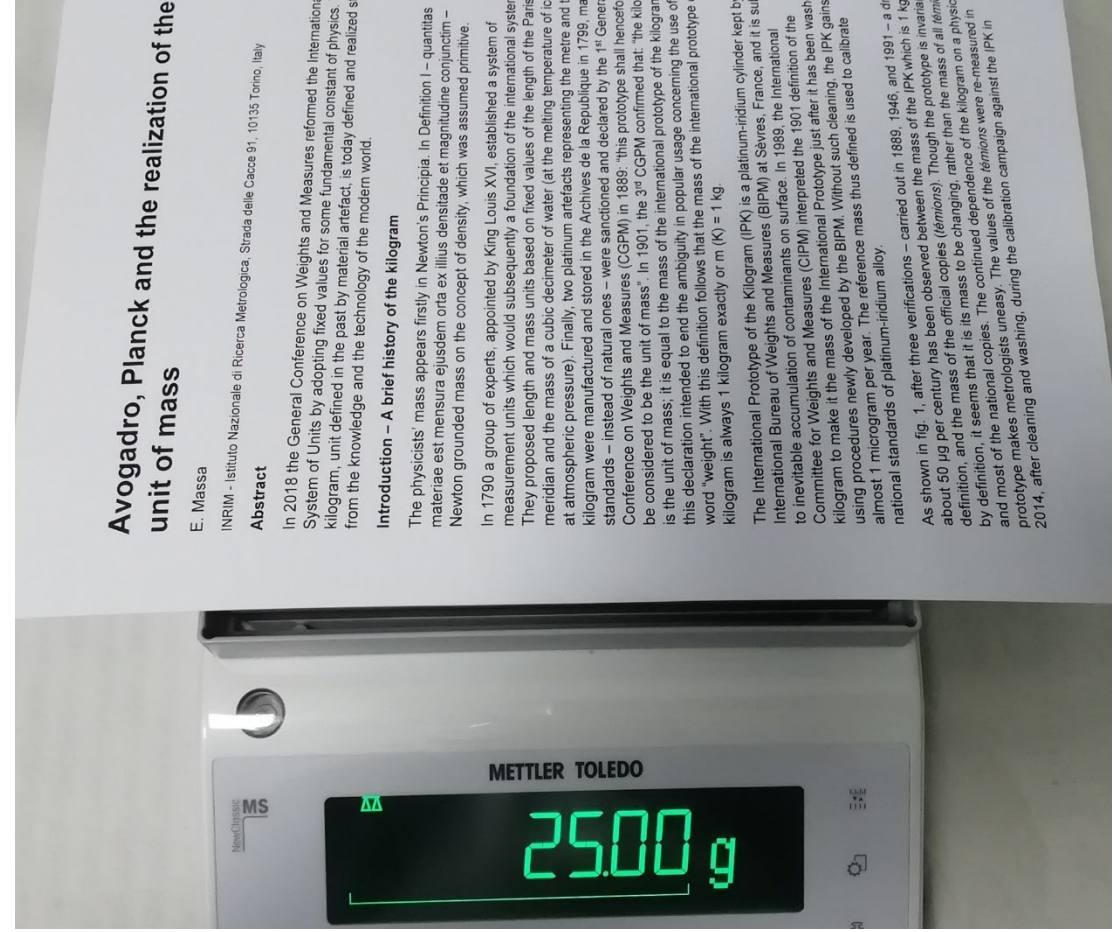
Focus on realization, maintenance and  
dissemination of the kilogram



# Approfondimento rivista IOP - Metrologia

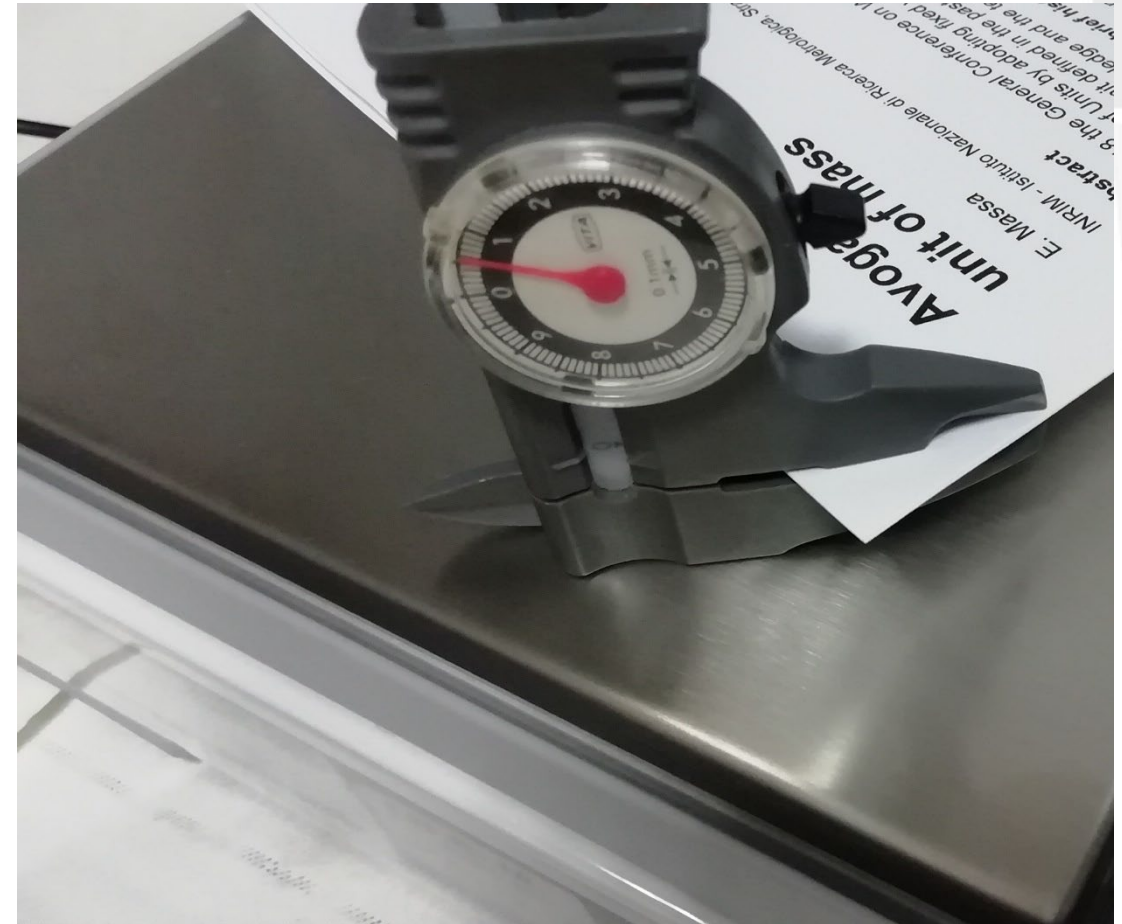


# Contenuti Convegno LS-OSA “un confronto scientifico”



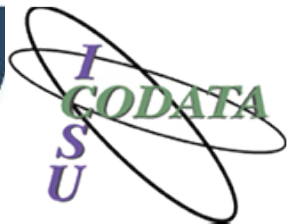


# Contenuti Convegno LS-OSA “un confronto scientifico”





# Committee on Data for Science and Technology



# CODATA

OPEN ACCESS  
IOP Publishing | Bureau International des Poids et Mesures  
Metrologia 55 (2018) L13–L16  
<https://doi.org/10.1088/1681-7575/aa950a>

## Short Communication

### The CODATA 2017 values of $h$ , $e$ , $k$ , and $N_A$ for the revision of the SI

D B Newell<sup>1</sup>, F Cabiati, J Fischer, K Fujii, S G Karshenboim, H S Margolis<sup>2</sup>, E de Mirandés, P J Mohr, F Nez, K Pachucki, T J Quinn, B N Taylor, M Wang, B M Wood and Z Zhang

Committee on Data for Science and Technology (CODATA) Task Group on Fundamental Constants

E-mail: [dnewell@nist.gov](mailto:dnewell@nist.gov)

Received 2 August 2017, revised 19 October 2017  
Accepted for publication 20 October 2017  
Published 29 January 2018



**Abstract**  
Sufficient progress towards redefining the International System of Units (SI) in terms of exact values of fundamental constants has been achieved. Exact values of the Planck constant  $h$ , elementary charge  $e$ , Boltzmann constant  $k$ , and Avogadro constant  $N_A$  from the CODATA 2017 Special Adjustment of the Fundamental Constants are presented here. These values are recommended to the 26th General Conference on Weights and Measures to form the foundation of the revised SI.

**Keywords:** international system of units, fundamental constants, SI redefinition  
(Some figures may appear in colour only in the online journal)

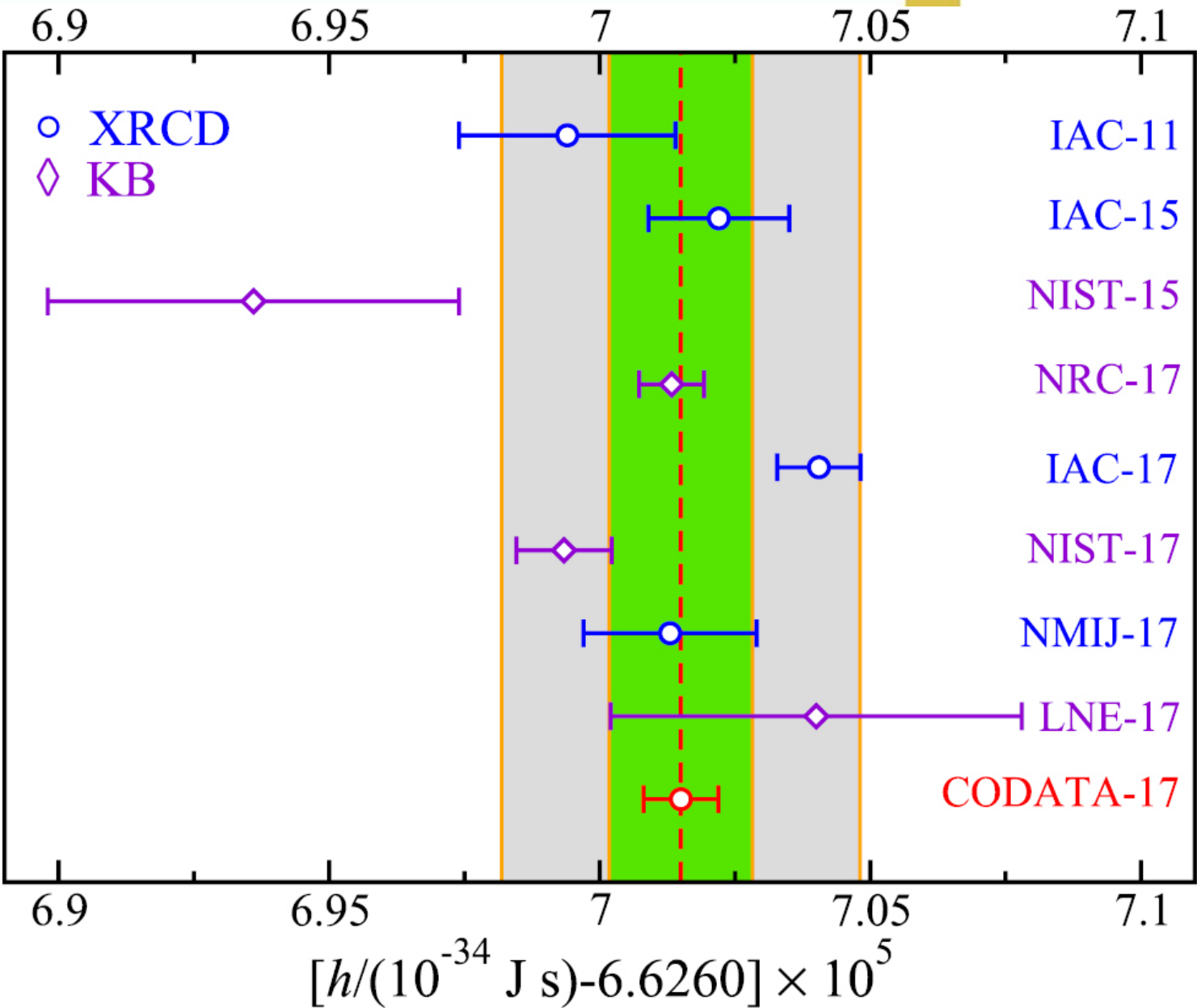
## 1. Introduction

The international system of units (SI) has been slowly evolving from an artifact based system to one based on values of fundamental constants and invariant properties of atoms. The quantitative limitations of the last remaining base unit of the SI defined by an artifact, the kilogram, have been known since at least the third verification of national kilogram prototypes (Quinn 1991, Girard 1994). As a consequence the possible role of the fundamental constants in replacing the kilogram has been discussed in earnest for nearly three decades. International consensus on the foundation of a new system of units based on exactly defined values of the Planck constant  $h$ , elementary charge  $e$ , Boltzmann constant  $k$ , and Avogadro constant  $N_A$  was reached during the 24th meeting of the General Conference on Weights and Measures (CGPM

2011). Progress in the accuracy and consistency of the research results has enabled the 106th International Committee for Weights and Measures (CIPM) to recommend proceeding with the adoption of the revised SI (CIPM 2017).

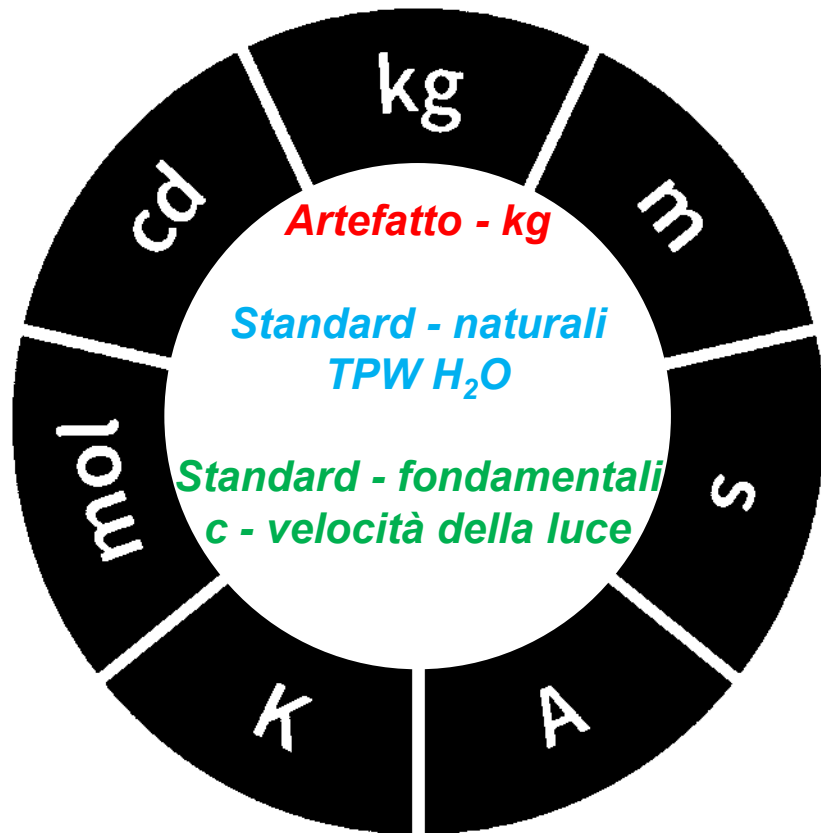
The Committee on Data for Science and Technology (CODATA), through its Task Group on Fundamental Constants (TGFC), periodically provides the scientific and technological communities with a self-consistent set of internationally recommended values of the basic constants and conversion factors of physics and chemistry. Because of this role, the CGPM invited the CODATA TGFC to carry out a special least-squares adjustment (LSA) of the values of the fundamental physical constants to provide values for defining constants to form the foundation for the revised SI (CGPM 2011). The results of that adjustment are given here, namely, the numerical values of  $h$ ,  $e$ ,  $k$ , and  $N_A$ , each with a sufficient number of digits to maintain consistency between the present and revised SI as proposed by the Consultative Committee for Units (CCU) and agreed to by the CIPM (CIPM 2016). These numbers are recommended to the 26th CGPM to establish the revised SI when it convenes in November 2018.

<sup>1</sup> Chair  
 Original content from this work may be used under the terms of the [Creative Commons Attribution 3.0 licence](https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/). Any further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the title of the work, journal citation and DOI.

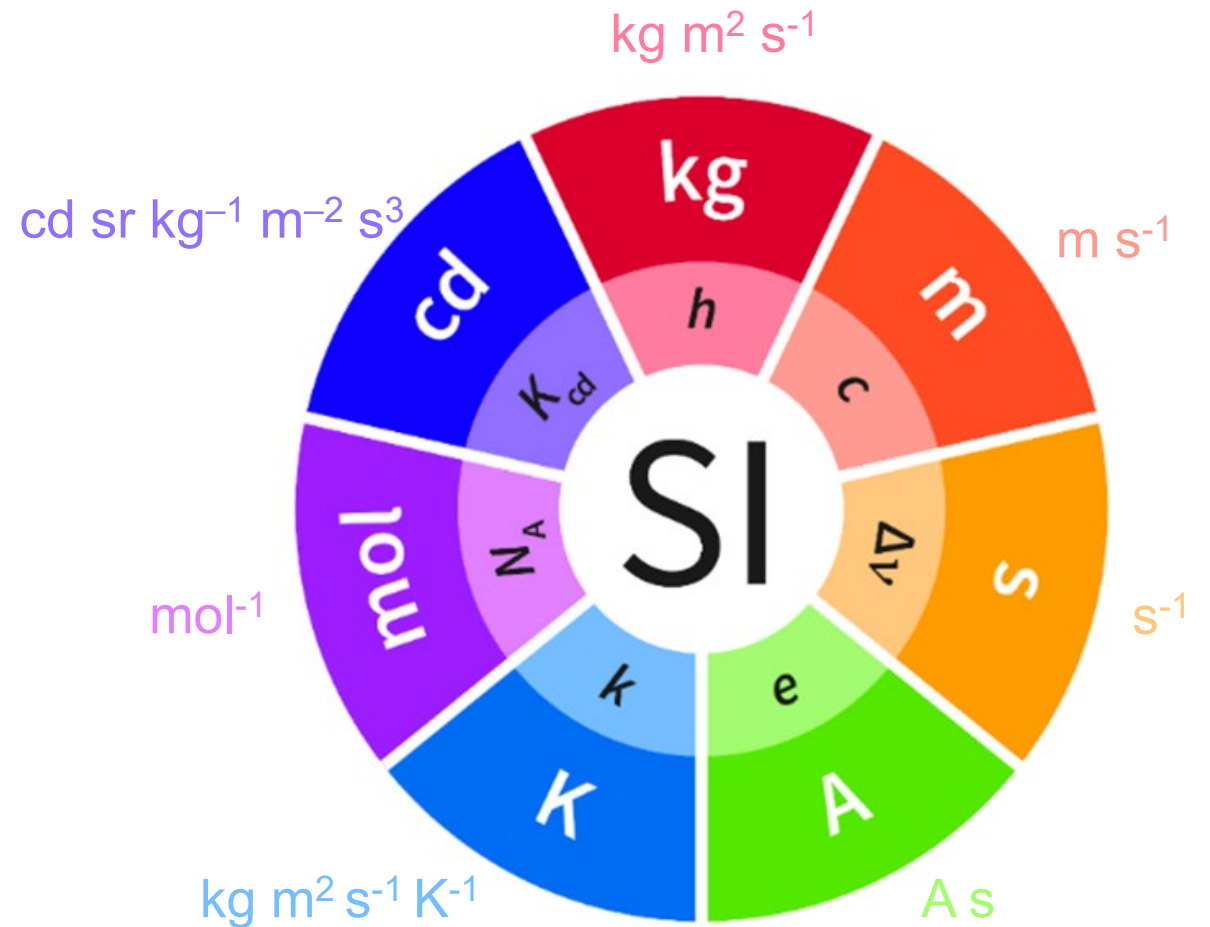


# Un nuovo paradigma

*Sistema definito sulle unità*



*Sistema definito sulle costanti*



# Realizzazione del kg - il progetto Avogadro



$$N = \frac{V}{V_{\text{atomo}}} = \frac{8V}{a^3}$$

$V$   
 $a^3$   
8

volume macroscopico della sfera  
volume microscopico della cella elementare  
numero di atomi contenuti nella cella

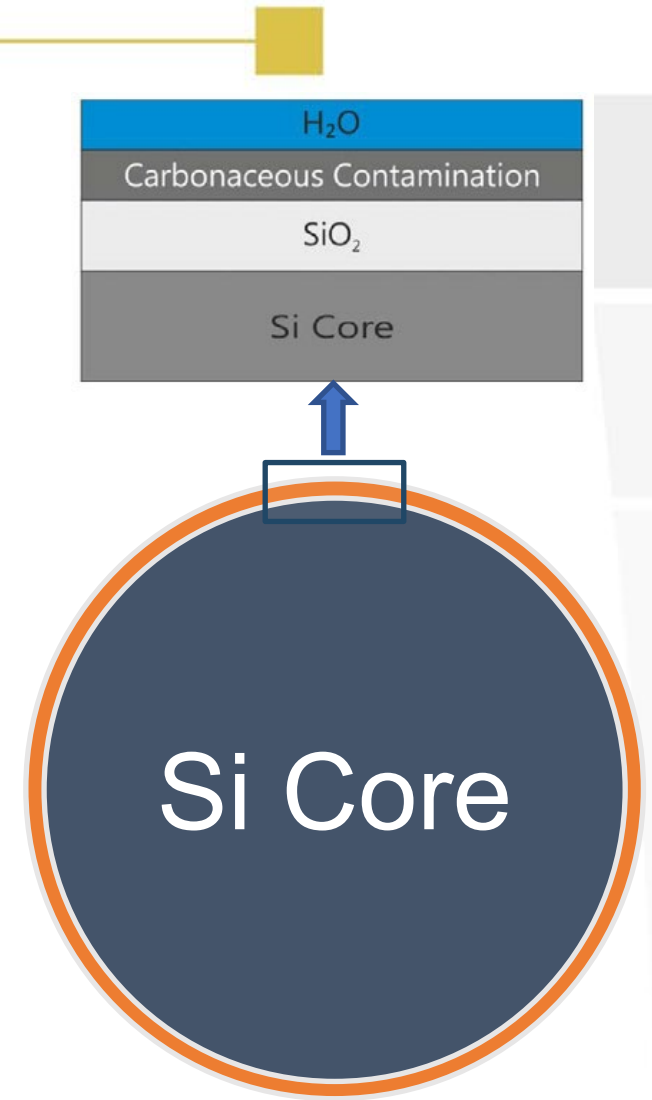


# Realizzazione del kg - il progetto Avogadro

La determinazione assoluta della massa della sfera si ottiene sommando le masse della superficie alla massa di silicio  $^{28}\text{Si}$

$$m_{\text{sphere}} = m_{\text{core}} + m_{\text{SL}}$$

$$m_{\text{core}} = Nm(\text{Si}) = \frac{8V_{\text{core}}}{a^3} m(\text{Si})$$



# Realizzazione del kg - il progetto Avogadro

Il silicio in natura è stabile negli isotopi  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{29}\text{Si}$ , e  $^{30}\text{Si}$ .

$$m(\text{Si}) = \sum_{k=28}^{30} f(^k\text{Si})m(^k\text{Si})$$

$f(^k\text{Si})$  rappresenta la frazione del  $k$ -esimo isotopo con il vincolo che  $\sum_k f(^k\text{Si})=1$



# Realizzazione del kg - il progetto Avogadro

Possiamo esprimere le masse dei singoli isotopi,  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{29}\text{Si}$ , e  $^{30}\text{Si}$

$$m(^k\text{Si}) = \frac{A_r(^k\text{Si})}{A_r(e)} m(e)$$





# Realizzazione del kg - il progetto Avogadro

Attraverso misurazioni di costanti fondamentali  $R_\infty$  e  $\alpha$  la massa dell'elettrone può essere espressa dalla relazione

$$m(e) = \frac{2hR_\infty}{c\alpha^2}$$

Diagram illustrating the constants involved in the equation for the electron mass  $m(e)$ :

- Costante di Planck ( $h$ )
- Costante di Rydberg ( $R_\infty$ )
- Velocità della luce in vuoto ( $c$ )
- Costante di struttura fine ( $\alpha$ )



# Realizzazione del kg - il progetto Avogadro

$$m_{sphere} = \frac{8V_{core}}{a^3} \frac{2hR_{\infty}}{c\alpha^2} \frac{\sum_{k=28}^{30} f(^kSi)A_r(^kSi)}{A_r(e)} - m_{deficit} + m_{SL}$$

Numero di atomi

Massa dell'elettrone

Rapporto tra le masse del silicio - elettrone

Impurezze e difetti

Massa della superficie



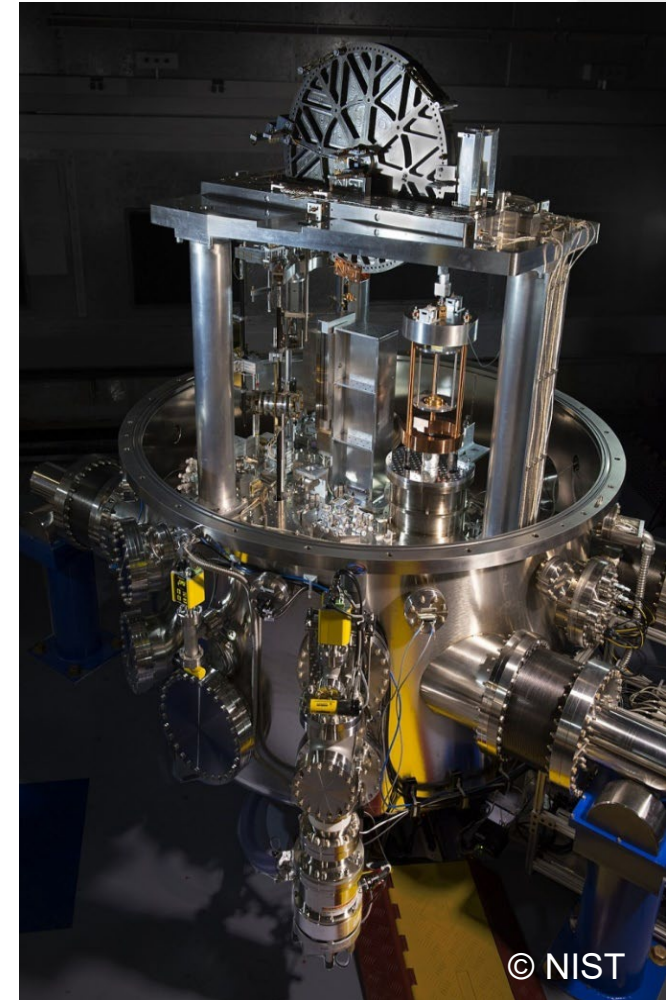
# Realizzazione del kg – la bilancia di Kibble

Per misurare la **massa** con una bilancia di Kibble, quattro differenti quantità devono essere misurate con una incertezza commisurata con l'obiettivo desiderato.

Queste quantità sono:

- Tensione  **$V$**
- Corrente  **$I$**
- Velocità  **$u$**
- Accelerazione di gravità  **$g$**

Il bilancio di potenza è virtuale ed eseguito *generalmente* in due fasi sperimentali distinte.





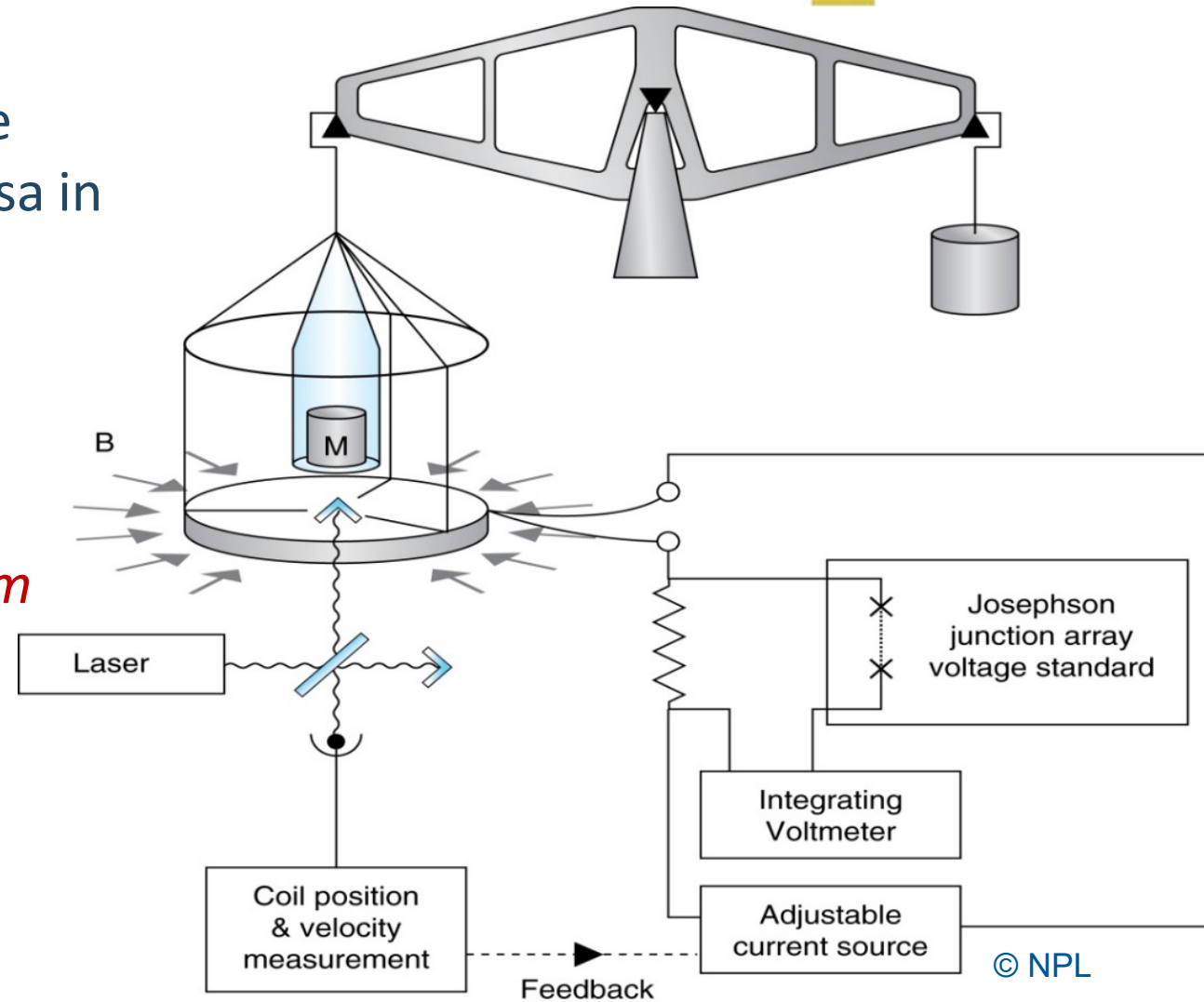
# FASE I: Il modo statico

Una forza  $F$  è generata da una corrente  $I$  che attraversa una bobina di lunghezza  $L$  immersa in un campo magnetico  $B$

$$F = BLI$$

Se la forza  $F$  equilibria il peso di una massa  $m$  immersa in un campo gravitazionale  $g$  otteniamo

$$mg = BLI$$



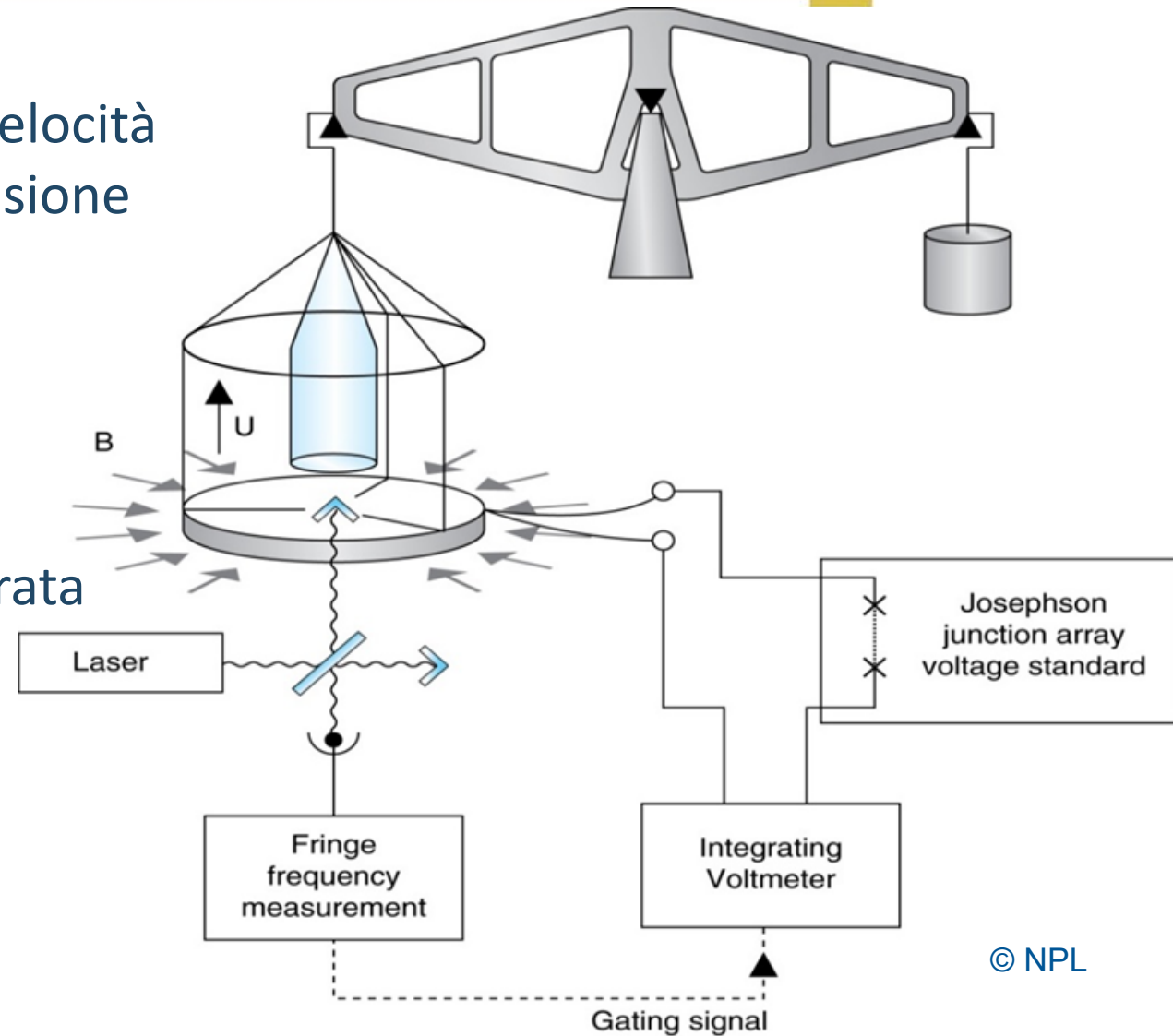
# FASE II: Il modo dinamico

Muovendo la bobina nel campo  $B$  con una velocità nota  $u$  si genera ai capi della bobina una tensione  $V$

$$V = BLu$$

E quindi possibile ottenere una misura accurata del termine  $BL$  dal rapporto

$$BL = V / u$$



# Il confronto virtuale di potenze

Fase I - “modo statico”  $mg = BLI$

Fase II – “modo dinamico”  $V = BLu$

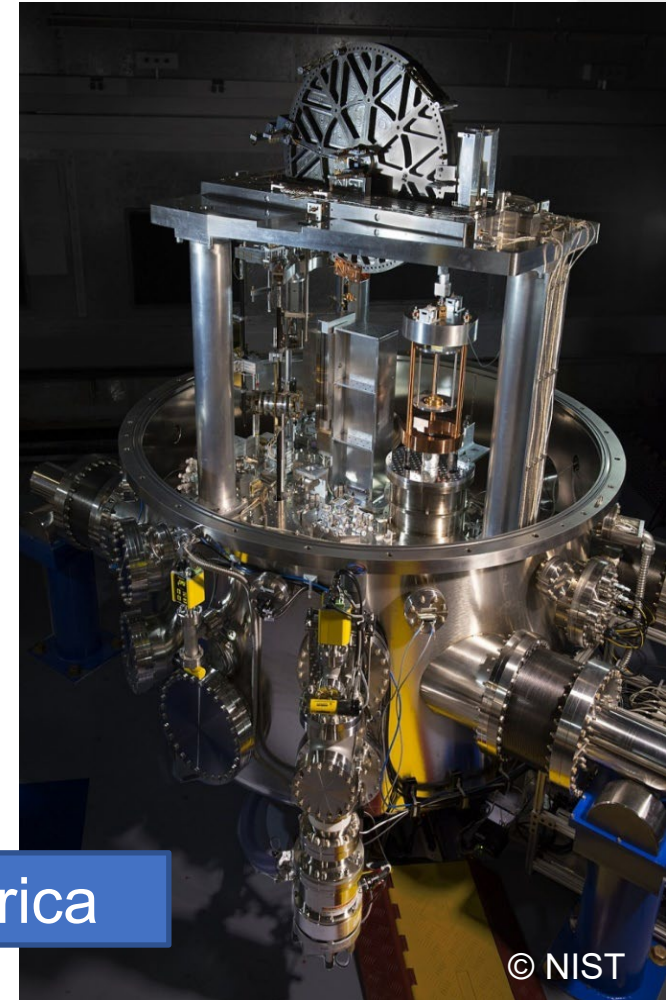


Potenza virtuale

$$mgu = VI$$

Potenza meccanica

Potenza elettrica



© NIST



# Il confronto virtuale di potenze

Legge di Ohm

$$I = V / R$$

Potenza virtuale

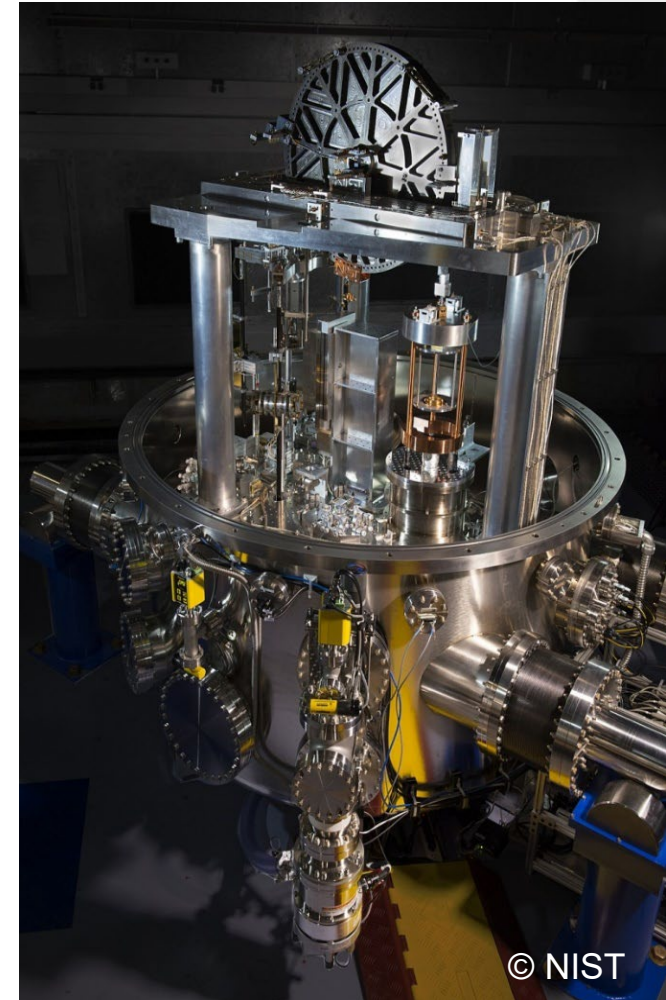
$$mgu = VI = V^2 / R$$

“Josephson effect”

$$V \propto h / 2e$$

“quantum Hall effect”

$$R \propto h / e^2$$



# Il confronto virtuale di potenze

$$P = V^2 / R = (V_1 V_2) / R$$

Attraverso gli effetti Josephson e quantum Hall possiamo esprimere le espressioni

$$V_1 = n_1 \frac{h}{2e} v_1$$

$$V_2 = n_2 \frac{h}{2e} v_2$$

$$R = r \frac{h}{e^2}$$

Sostituendo otteniamo

$$P = n_1 n_2 v_1 v_2 \frac{h}{2e} \frac{h}{2e} \frac{e^2}{r h} = \frac{n_1 n_2}{4r} v_1 v_2 h$$

# Il confronto virtuale di potenze

$$P = \frac{n_1 n_2}{4r} v_1 v_2 h$$

$$P = mgu = VI$$

$$m = \frac{n_1 n_2}{4r} \frac{v_1 v_2}{gu} h$$

La **massa** è in relazione con la costante di **Planck**



A makeover for the SI

also:

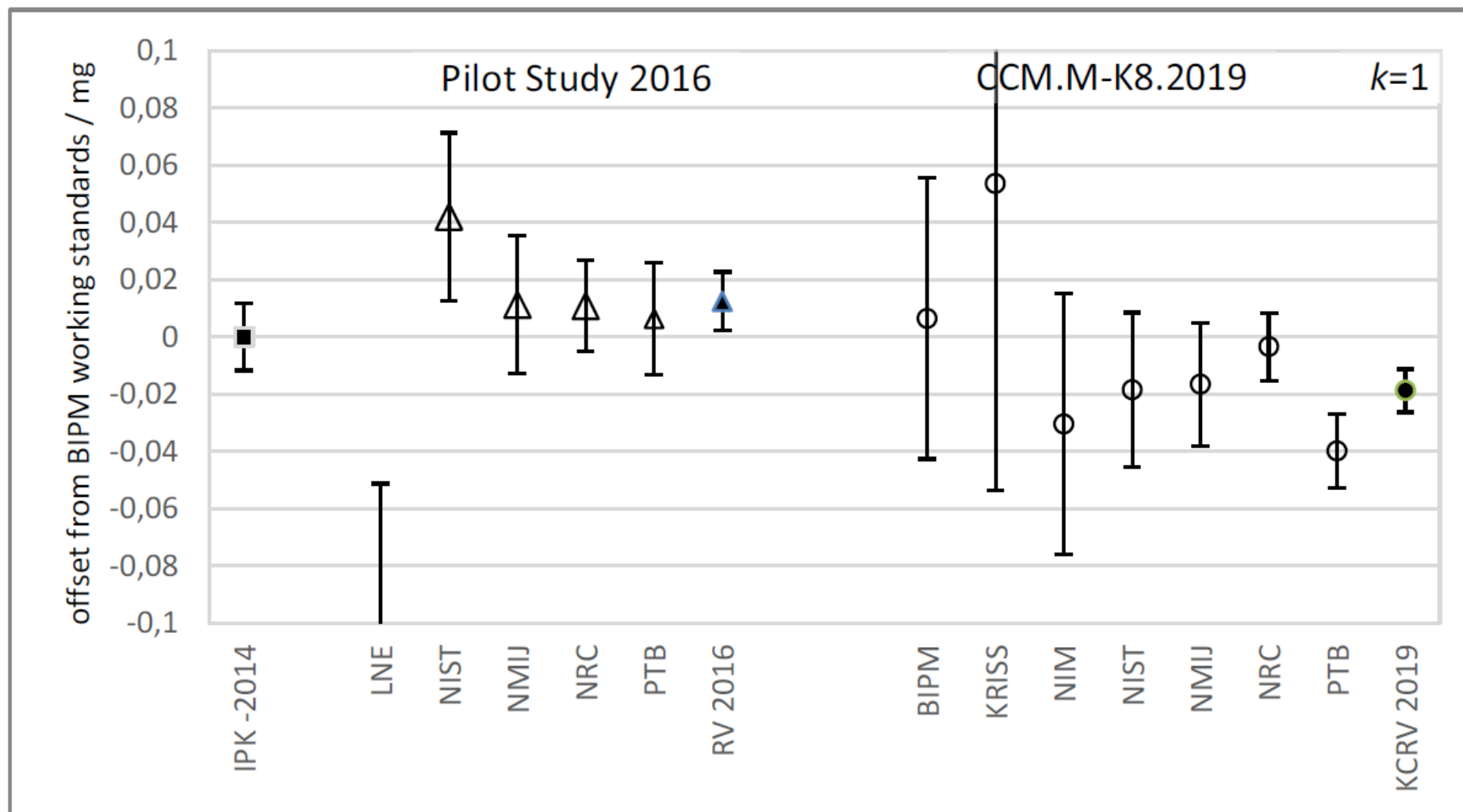
Cold electrons for fast diffraction ◀

The ozone hole turns 30 ◀

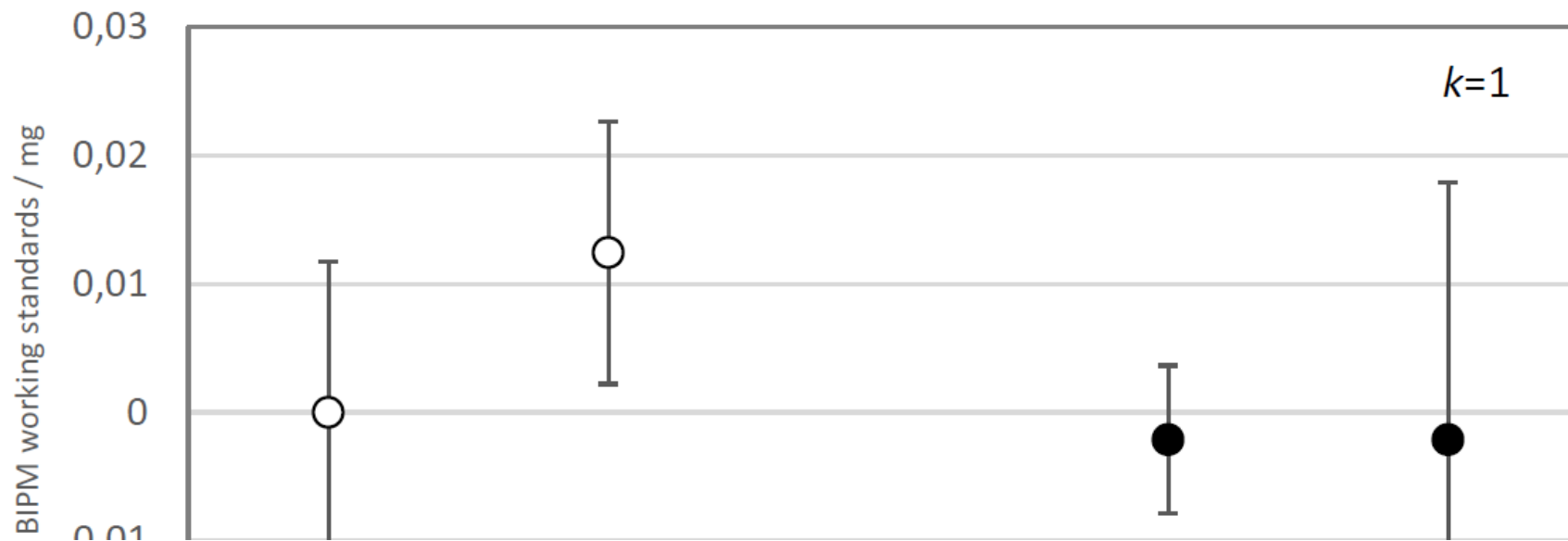
Strategizing for high-energy physics ◀



# Realizzazione del kg - il confronto internazionale



# Realizzazione del kg - il confronto internazionale



**This means that mass values of 1 kg standards based on the consensus value will be 2  $\mu$ g lower than those based on the BIPM as-maintained mass unit.**

**To achieve consistency with the consensus value of 2020, all NMIs would need to reduce the mass value of their national prototype by 2  $\mu$ g. Since the uncertainty of the consensus value is 20  $\mu$ g, in practice no correction of the mass of the national prototype is necessary. Only the uncertainty needs to be increased.**

# Il risultato del nuovo SI

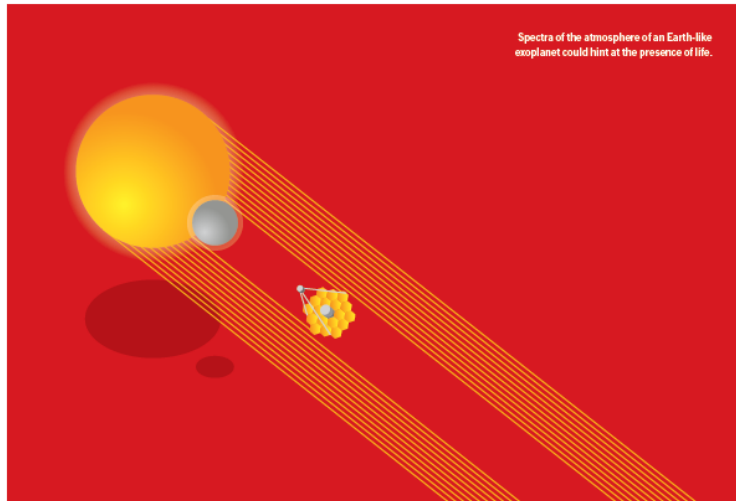


© Pauline Barat / BIPM



# Nature 481 2012 – Tough Science

NEWS IN FOCUS



## TOUGH SCIENCE

*Five experiments as hard as finding the Higgs.*

BY NICOLA JONES

A

s the media spotlight shines on the Large Hadron Collider in Geneva and its high-profile hunt for a certain boson, other scientists are pressing forward with experiments that are just as challenging — and just as potentially transformative.

These often unsung researchers are willing to spend years or even decades getting a finicky instrument to run smoothly; setting up proper controls to minimize spurious results; beating back noise that threatens to swamp their signal; and striving for an ever more painstaking level of precision — a determination and single-mindedness that borders on heroic. Here, *Nature* describes five such quests.

### SPOTTING DISTANT SIGNS OF LIFE

Back in 1999, when David Charbonneau was a graduate student at Harvard University in Cambridge, Massachusetts, he became the first person to measure the tiny dimming caused by the passage of a planet from another solar system across the face of its parent star. Today, such 'transits' are a routine way for astronomers to discover planets. The tricky part is working out what they and their atmospheres are made of. If the atmosphere turns out to contain oxygen, for instance, that could be an indication of the presence of life. But the only way to detect such elements is to find them in the spectrum of the starlight that passes through the planet's atmosphere — a signal that is ridiculously small.

To begin with, explains Charbonneau, "the fraction of light that the planet blocks is tiny". A planet the size of Jupiter passing in front of a star like the Sun would block about 1% of the light; and a smaller, Earth-size planet would block about 0.01%. "Then you look at this tiny onion skin around the planet: that's the atmosphere,"

### SPOTTING DISTANT SIGNS OF LIFE

Back in 1999, when David Charbonneau was a graduate student at Harvard University in Cambridge, Massachusetts, he became the first

### SEEING THROUGH THE MOLECULAR MIRROR

Biology has a curious lopsidedness. Many molecules are 'chiral', meaning that their atoms can be arranged in two forms that are mir-

### LOOKING FOR EXTRA DIMENSIONS

It is an aspect of reality so fundamental that most of us can't imagine anything different: the world has precisely three spatial dimensions —

### CATCHING A GRAVITY WAVE

Scott Ransom has a boyish energy that seems mismatched with his subject: a project that may take a decade to produce its first result.

### REDEFINING THE KILOGRAM

The mass of one kilogram is meant to be an unvarying constant. Yet it actually changes, thanks to an old-fashioned way of defining it as the mass of a more-than-120-year-old cylinder of platinum and iridium that lives in a vault in the outskirts of Paris. No one knows if 'Le Grand K' is getting heavier as atoms are added to its surface, or lighter as atoms are rubbed away, but its mass is certainly drifting: copies that once had precisely the same weight now have measurably different weights.

# Grazie per l'attenzione

