La revisión del sistema internacional de unidades

Estefanía de Mirandés

BIPM

Centro Español de Metrología, 18 de Mayo 2018

Bureau International des Poids et Mesures

Esquema de la presentación

- El sistema internacional actual
  - Con sus 7 unidades de base
  - es el heredero del sistema métrico
  - y del sistema MSKA
- Ha cambiado ya…
  - en 1967 : redefinición del segundo
  - en 1983 : redefinición del metro
- … y va a cambiar en 2018 con la redefinición del kilogramo, del amperio, del kelvin y del mol
  - el problema con las unidades eléctricas
  - el problema con el kilogramo
  - la decisión tomada y la determiación de las cuatro constantes físicas
  - el SI tras la revisión

Bureau International des Poids et Mesures

Medir es…

Comparar cuantitativamente

…una magnitud de valor desconocido con una magnitud de referencia

Esta referencia es la unidad, elegida por convención

El sistema internacional (SI) hoy

El SI se funda sobre una selección de **7 unidades de base** bien definidas y consideradas convencionalmente como independientes desde el punto de vista dimensional

Magnitud	Unidad	Símbolo
longitud	metro	m
masa	kilogramo	kg
tiempo	segundo	s
intensidad de corriente électrica	amperio	A
temperatura	kelvin	K
cantidad de sustancia	mol	mol
intensidad luminosa	candela	cd

Las unidades de base permiten definir todas las unidades del SI. Las unidades que no son de base se denominan unidades derivadas y siempre pueden ser expresadas como proporcionales a

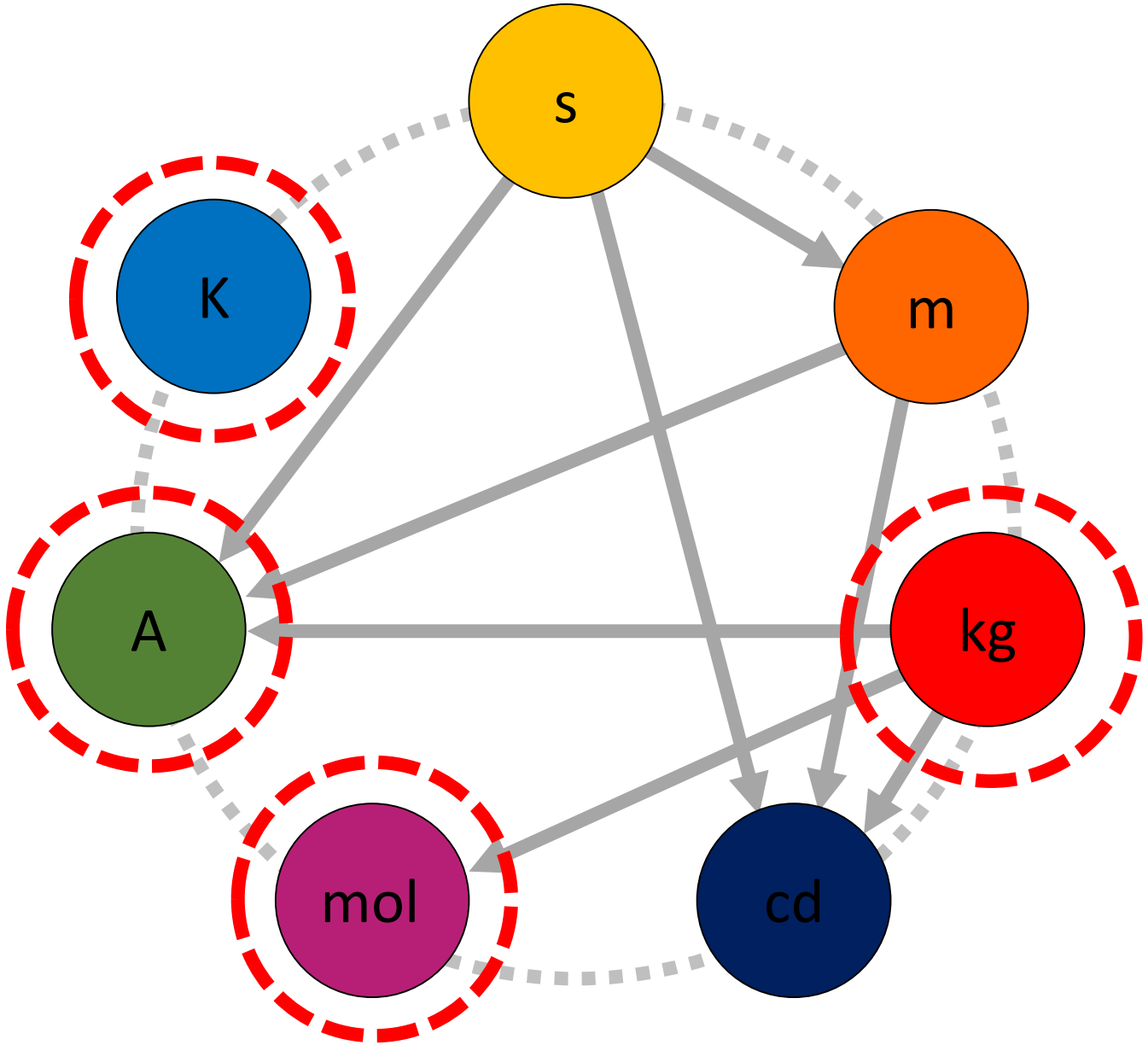
$$s^{\alpha}\ m^{\beta}\ kg^{\gamma}\ A^{\delta}\ K^{\varepsilon}\ mol^{\zeta}\ cd^{\eta}$$

Por ejemplo, la magnitud resistencia eléctrica tiene por unidad el l'ohmio (Ω) = $kg\ m^2\ s^{-3}\ A^{-2}$

El SI nace en 1960 (11ª CGPM) con 6 unidades de base; el mol fue añadido al SI en 1971 (14ª CGPM)

Bureau International des Poids et Mesures

El Sistema Internacional de Unidades



Bureau International des Poids et Mesures

Esquema de la presentación

- El sistema internacional actual
  - Con sus 7 unidades de base
  - **es el heredero del sistema métrico**
  - y del sistema MSKA
- Ha cambiado ya…
  - en 1967 : redefinición del segundo
  - en 1983 : redefinición del metro
- … y va a cambiar en 2018 con la redefinición del kilogramo, del amperio, del kelvin y del mol
  - el problema con las unidades eléctricas
  - el problema con el kilogramo
  - la decisión tomada y la determiación de las cuatro constantes físicas
  - el SI tras la revisión

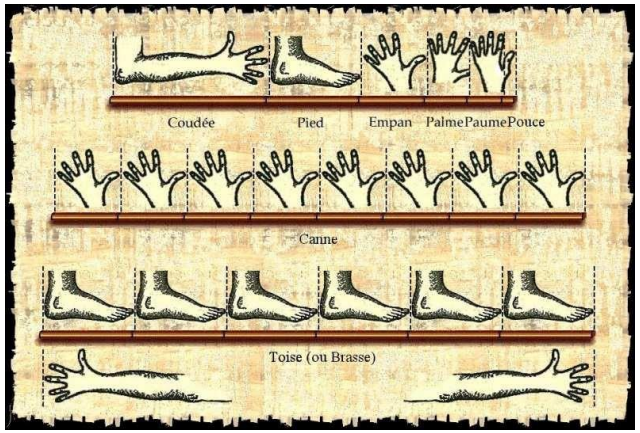
Bureau International des Poids et Mesures

El metro y el kilogramo nacen en Francia al final del siglo 18

Anteriormente:

Cada región poseía su propio sistema de medidas... Por ejemplo para la longitud : vara, palma, legua, caña, toesa, pies

... Y una misma unidad podía tomar diferentes valores según las épocas o los lugares :
toesa de Carlomagno, toesa de Châtelet, toesa de Perú



Los boticarios, para pesar :
la libra valía 12 onzas, la onza 8 dracmas, el dracma 3 escrúpulos y el escrúpulo 20 granos.

En 1788, los cuadernos de quejas (cahiers de doléance) :

En todas partes, la gente pide que no haya más « deux poids, deux mesures »
-« para que el consumidor no sea más engañado»
-« para evitar un sinfín de cálculos que la mayoría de campesinos no son capaces de efectuar y que provocan errores cotidianamente »

El 9 de Marzo de 1790, Talleyrand propone a la Asamblea francesa un **informe sobre la necesidad de uniformizar en todo el Reino todas las medidas de longitud y de gravedad.**

Bureau International des Poids et Mesures

Histoire de l'Académie des Sciences vol. of **1788** pp 7 - 16

RAPPORT

FAIT À L'ACADÉMIE DES SCIENCES,

Sur le choix d'une unité de Mesures.

Par MM. BORDA, LAGRANGE, LAPLACE, MONGE & CONDORCET.

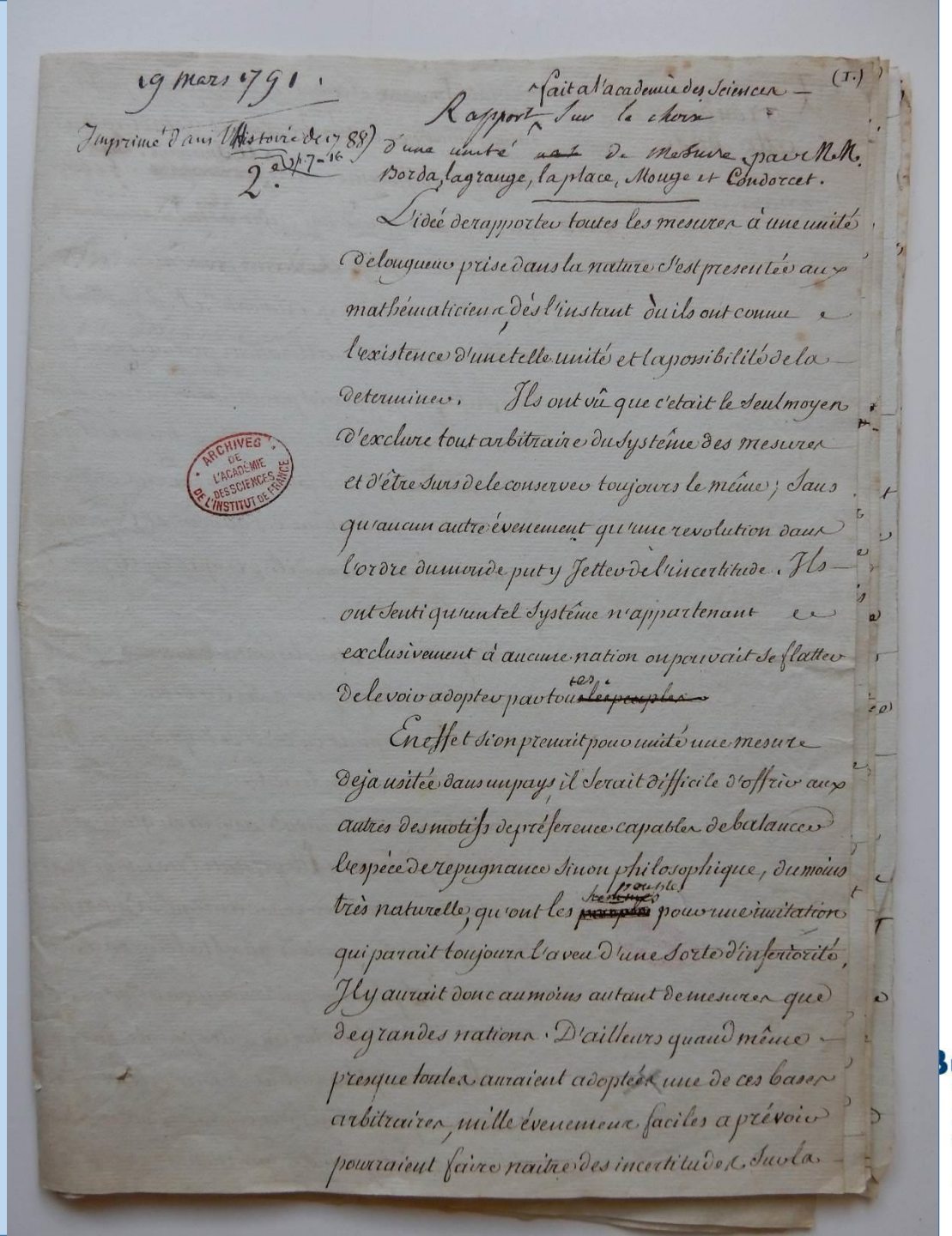
L'IDÉE de rapporter toutes les mesures à une unité de longueur prise dans la nature, s'est présentée aux mathématiciens dès l'instant où ils ont connu l'existence d'une telle unité & la possibilité de la déterminer. Ils ont vu que c'étoit le seul moyen d'exclure tout arbitraire du systême des mesures, & d'être sûr de le conserver toujours le même, sans qu'aucun autre événement, qu'aucune révolution dans l'ordre du monde [illegible] y jeter de l'incertitude; ils ont senti qu'un tel systême n'appartenant exclusivement à aucune nation, on pouvoit se flatter de le voir adopter par toutes. *19 mars 1791*

En effet, si on prenoit pour unité une mesure déjà usitée dans un pays, il seroit difficile d'offrir aux autres des motifs de préférence capables de balancer l'espèce de répugnance, sinon philosophique, du moins très-naturelle, qu'ont les peuples pour une imitation qui paroît toujours l'aveu d'une sorte d'infériorité : il y auroit donc au moins autant de mesures que de grandes nations. D'ailleurs, quand même presque toutes auroient adopté une de ces bases arbitraires, mille événemens faciles à prévoir, pourroient faire naître des incertitudes sur la véritable grandeur de cette base; & comme il n'existeroit point de moyen rigoureux de vérification, il s'établiroit à la longue des différences entre les mesures. La diversité qui existe

Foto TJQ

Bureau International des Poids et Mesures

Primera página del informe de la Academia de las ciencias francesa sobre la elección de una unidad de medida, firmado por Borda, Lagrange, Laplace, Monge and Condorcet
19 Marzo 1791



19 mars 1791.

Imprimé d'après l'Histoire de l'a 88) 2. ed. p. 7-16

(1.)

Fait à l'academie des Sciences —

Rapport sur le choix d'une unité de Mesure, par MM. Borda, Lagrange, Laplace, Monge et Condorcet.

L'idée de rapporter toutes les mesures à une unité de longueur prise dans la nature s'est presentée aux mathématiciens dès l'instant où ils ont connu l'existence d'une telle unité et la possibilité de la determiner. Ils ont vû que c'était le seul moyen d'exclure tout arbitraire du systême des mesures et d'être sûrs de le conserver toujours le même; sans qu'aucun autre événement qu'une revolution dans l'ordre du monde put y jetter de l'incertitude. Ils ont senti qu'un tel systême n'appartenant exclusivement à aucune nation on pouvait se flatter de le voir adopter par tous les peuples.

En effet si on prenait pour unité une mesure deja usitée dans un pays, il serait difficile d'offrir aux autres des motifs de préference capables de balancer l'espèce de repugnance sinon philosophique, du moins très naturelle, qu'ont les peuples pour une imitation qui parait toujours l'aveu d'une sorte d'infériorité. Il y aurait donc au moins autant de mesures que de grandes nations. D'ailleurs quand même presque toutes auraient adopté une de ces bases arbitraires, mille événemens faciles a prévoir pourraient faire naître des incertitudes sur la

ARCHIVES DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES DE L'INSTITUT DE FRANCE

Foto TJQ

Bureau International des Poids et Mesures

Borda, Lagrange, Laplace, Monge et Condorcet.

L'idée de rapporter toutes les mesures à une unité de longueur prise dans la nature s'est presentée aux mathématiciens dès l'instant où ils ont connu l'existence d'une telle unité et la possibilité de la determiner. Ils ont vû que c'etait le seul moyen d'exclure tout arbitraire du systême des mesures et d'être sûrs de le conserver toujours le même; sans qu'aucun autre évenement qu'une revolution dans l'ordre du monde put y jetter de l'incertitude. Ils ont senti qu'un tel systême n'appartenant exclusivement à aucune nation on pouvait se flatter de le voir adopter par tous les peuples.

Foto TJQ

Bureau International des Poids et Mesures

“The idea of referring all measurements to a unit of length taken from nature was seized upon by mathematicians as soon as the existence of such a unit and the possibility of determining it became known. They saw it as the only way to exclude all that was arbitrary from a system of measurement and to conserve it unchanged, so that no event or revolution in the world could cast uncertainty upon it.

They felt that with such a system, belonging exclusively to no one nation, one could hope that it would be adopted by all.”

Bureau International des Poids et Mesures

affecter une sorte de ~~prééminence~~ prééminence.

Nous concluons ~~enfin~~ en conséquence présenter ce rapport à l'assemblée nationale en la priant de vouloir bien décréter les opérations proposées et les mesures nécessaires pour l'exécution de celles qui doivent s'étendre sur le territoire de l'Espagne.

fait à l'académie le 19 Mars 1791.

Borda Lagrange Laplace

Monge Condorcet

ACADÉMIE DES SCIENCES
ARCHIVES
INSTITUT DE FRANCE

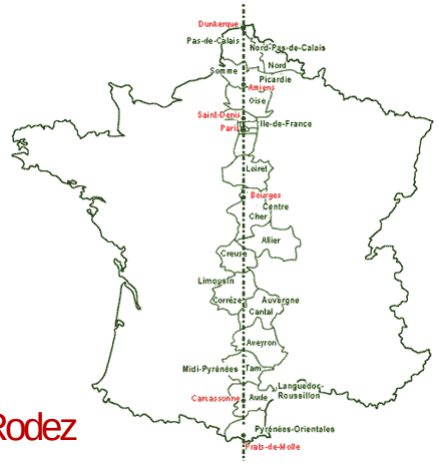
Bureau International des Poids et Mesures

Hay que definir unidades nuevas y universales.
Deben ser independientes de «todo lugar y toda nación ».

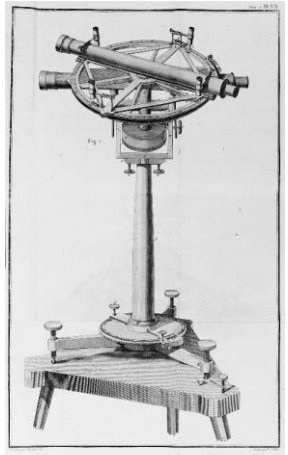
La nueva unidad de longitud será una diez millonésima parte del cuarto del meridiano terrestre

Para medir por triangulación el arco de Dunkerque a Barcelona, Delambre y Méchain parten de París en mayo de 1792

Jean-Baptiste Delambre
desde Dunkerque hasta Rodez



Pierre Méchain
desde Barcelona hasta Rodez



Círculo repetidor de Borda

Volverán juntos a París en noviembre de 1798!

La nueva unidad de masa, llamada originalmente el *grave*, será la masa de un decímetro cúbico de agua destilada

Bureau International des Poids et Mesures

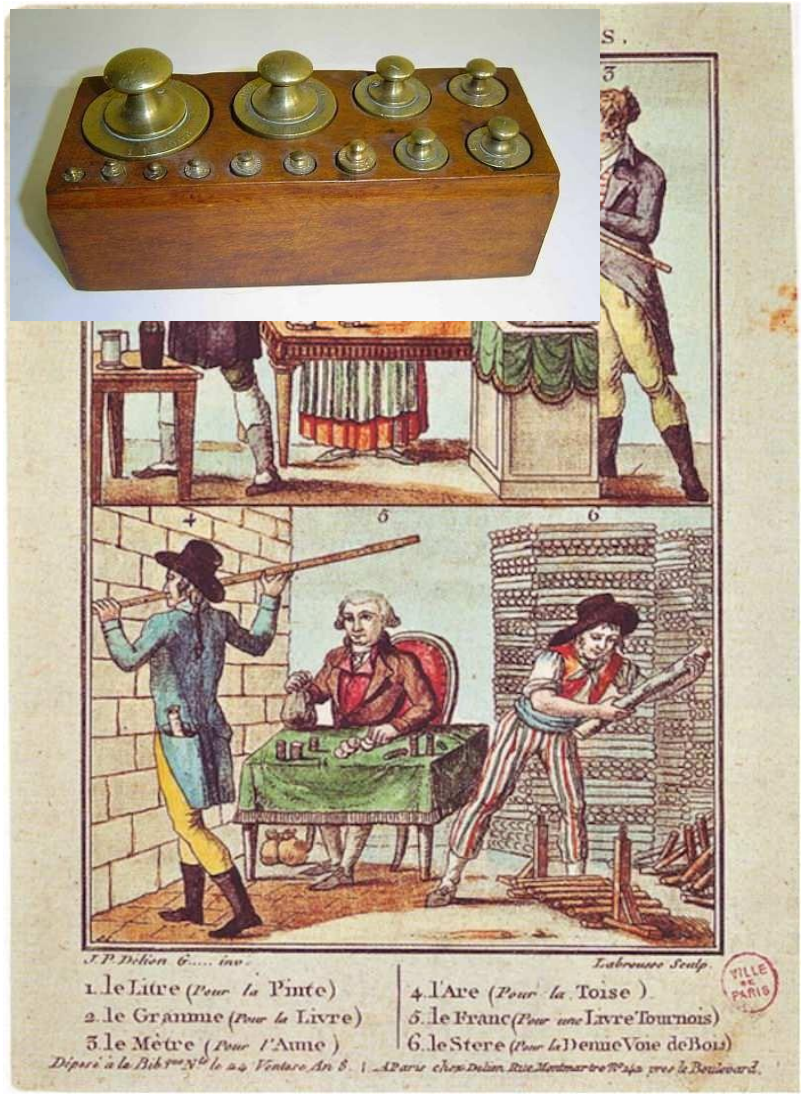
- La ley del 18 Germinal del año III (7 abril 1795) instituye el sistema métrico decimal

- En Messidor del año III (julio 1795) un metro patrón provisional es fabricado por Lenoir en latón

Nuevos patrones de medida son fabricados y difundidos en toda Francia

En París el metro se materializa en dieciséis esculturas para permitir a los parisinos familiarizarse con la nueva unidad

Una de ellas subsiste todavía hoy en la esquina de la calle Garancière con la calle Vaugirard, frente al Senado, en su sitio original



Bureau International des Poids et Mesures

En noviembre 1798, Delambre y Méchain se reencuentran por primera vez en París

El cuarto del meridiano terrestre es evaluado como equivalente a 5 130 740 toesas y el metro “verdadero y definitivo” queda así definido

Metro “des archives”
Fabricado por Etienne Lenoir

Un prototipo de metro patrón es realizado en platino así como el kilogramo patrón que de él resulta

kilogramo "des Archives“
fabricado por Nicolas Fortin

Ambos son presentados a los diputados franceses de las dos Asambleas y son guardados en los Archivos de la República el 4 Mesidor del año VII (22 de junio 1799)

Bureau International des Poids et Mesures

Foto reciente del Metro y el Kilogramo de los Archivos de Francia

Bureau International des Poids et Mesures

Bureau International des Poids et Mesures

El sistema métrico es el antepasado del SI

« A tous les temps, à tous les peuples »

Este sello, que representa un ángel republicano midiendo un arco de meridiano terrestre, fue emitido en 1954, para la 10ª conferencia general de pesas y medidas

Bureau International des Poids et Mesures

El sistema métrico en algunas fechas

Revolución francesa :

- Establecimiento del Sistema métrico decimal en 1795
- depósito, el 22 de junio de 1799, de dos patrones en platino representando el metro y el kilogramo en los Archivos de la República en París

- El uso del sistema métrico es obligatorio en Francia el 1 de enero de 1840

1875 : el Tratado del Metro

tratado internacional que crea el BIPM

- firmado por 17 estados miembros (actualmente 57)

1889 : 1ª CGPM

- nuevos prototipos internacionales del metro y el kilogramo
- con el segundo de los astrónomos, el sistema de unidades mécanicas MKS

en platino iridio
90% Pt 10% Ir

Bureau International des Poids et Mesures

La unidad de tiempo: el segundo

- Fue definida originalmente como la **fraction 1/86 400 del día solar medio.** La definición del « día solar medio» fue dejada a los astrónomos.

Pero la rotación de la tierra presenta irregularidades...

- Para mayor precisión en la unidad de tiempo, **en 1960**, la 11ª CGPM aprueba una nueva definición propuesta por la 'Union astronómica internacional: **la fracción 1/31 556 925,9747 del año trópico** (*) **1900**.

(*) El año trópico es definido como el intervalo de tiempo, en la tierra, para que el sol vuelva a la misma posición en el ciclo de las estaciones

El segundo será nuevamente redefinido en 1967

Bureau International des Poids et Mesures

Redefinición del segundo a partir de átomos en 1967

Maxwell, en 1870 :

« Si queremos obtener patrones de longitud, de tiempo y de masa que permanezcan absolutamente estables, debemos buscarlos no en las dimensiones o el movimiento o la masa de nuestro planeta, sino en la longitud de onda, el período de vibración y la masa absoluta de esas moléculas perfectamente parecidas, inmortales e inalterables. »

Todos los átomos de un mismo elemento químico son idénticos (universalidad)

La 13ª CGPM (1967)

« considerando que la definición del segundo decidida por la 11ª CGPM (1960) no es suficiente para las necesidades actuales de la metrología...

... que el momento de reemplazar la definición actualmente en vigor de la unidad de tiempo del sistema internacional por una definición atómica ha llegado...»

Redefine el segundo :

« El segundo es la duración de 9 192 631 770 periodos de la radiación correspondiente à la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de cesio 133 »

Bureau International des Poids et Mesures

El metro había sido también redefinido a partir de un átomo

por la 11ª CGPM (1960) :

« El metro es la longitud igual a 1 650 763,73 longitudes de onda en el vacío de la radiación correspondiente à la transición entre los niveles $2p_{10}$ et $5d_5$ del átomo de kripton 86 »

El metro es redefinido de nuevo en 1983

La 17ª CGPM

Atribuye un valor exacto a la velociad de la luz y redefine así el metro:

« El metro es la longitud del trayecto recorrido por la luz en el vacío durante una fracción 1 / 299 792 458 de segundo »

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

Bureau International des Poids et Mesures

Aciertos del sistema internacional actual

- Todo el mundo lo usa!
  - *Es el lenguaje universal de la medida*

- Es un sistema coherente
  - *Sin factores de conversion internos al SI*

- Ha sabido evolucionar: introduciendo definiciones en función de paramétros universales y constantes fundamentales
  - *Abriendo el camino para las demás unidades*

Bureau International des Poids et Mesures

“Problemas” del sistema internacional actual

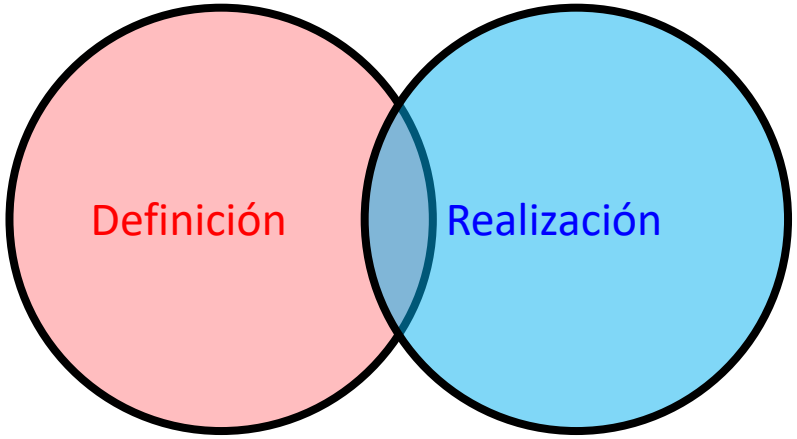
- El kilogramo sigue definido desde 1889 en función de un patrón material
- El amperio: realizaciones prácticas fuera del SI
- El kelvin: definido en función de una constante particular
- El mol: definido en función del kilogramo

Las definiciones están ligadas a realizaciones concretas

Bureau International des Poids et Mesures

Definiciones y Realizaciones: En General

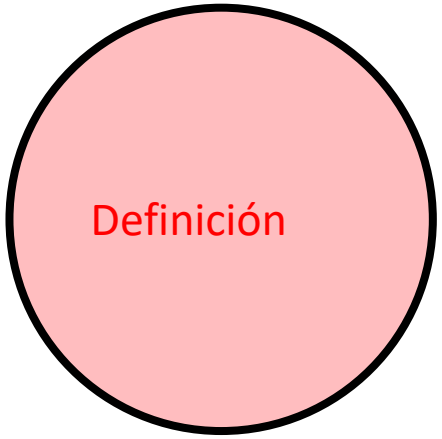
Tradicionalmente las definiciones de las unidades y las realizaciones han estado vinculadas



Bureau International des Poids et Mesures

Definiciones y Realizaciones: En General

Tradicionalmente las definiciones de las unidades y las realizaciones han estado vinculadas



Si separamos la definición de la realización…

…permitimos a las realizaciones de evolucionar durante décadas en modos que no podemos anticipar

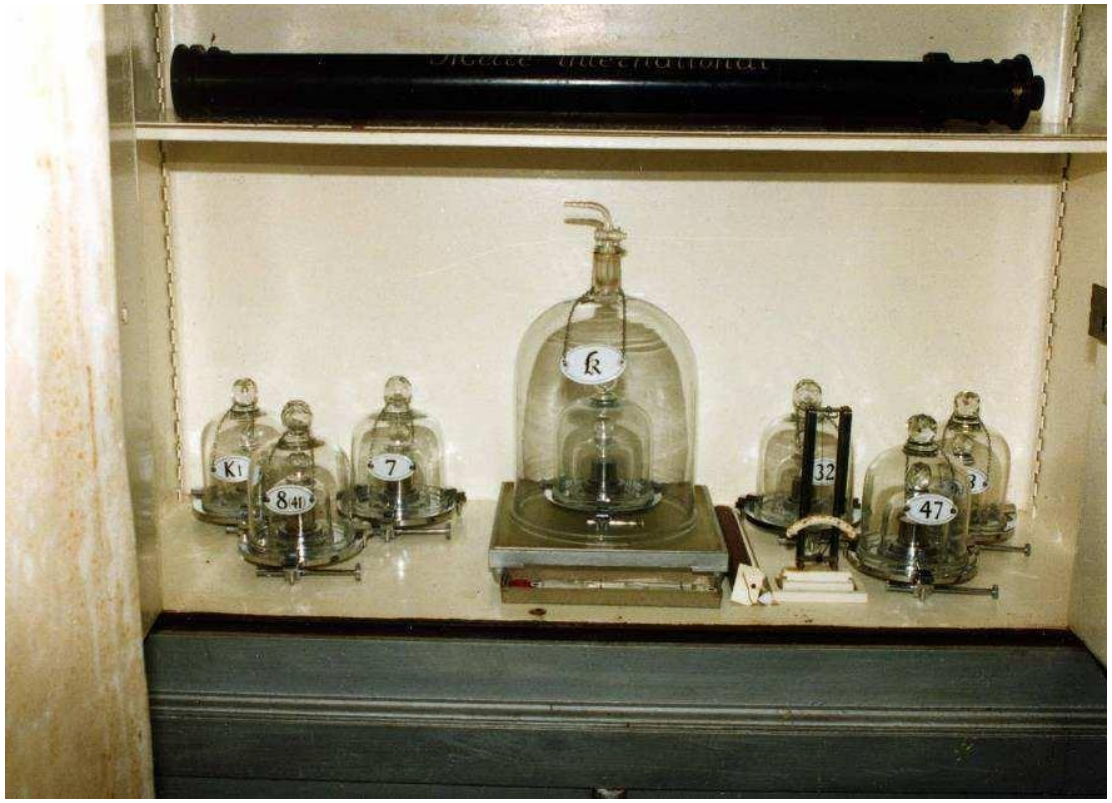
Bureau International des Poids et Mesures

El kilogramo hoy

"El kilogramo es la unidad de masa; es equivalente a la masa del prototipo internacional del kilogramo"

Guardado en el BIPM, cerca de París

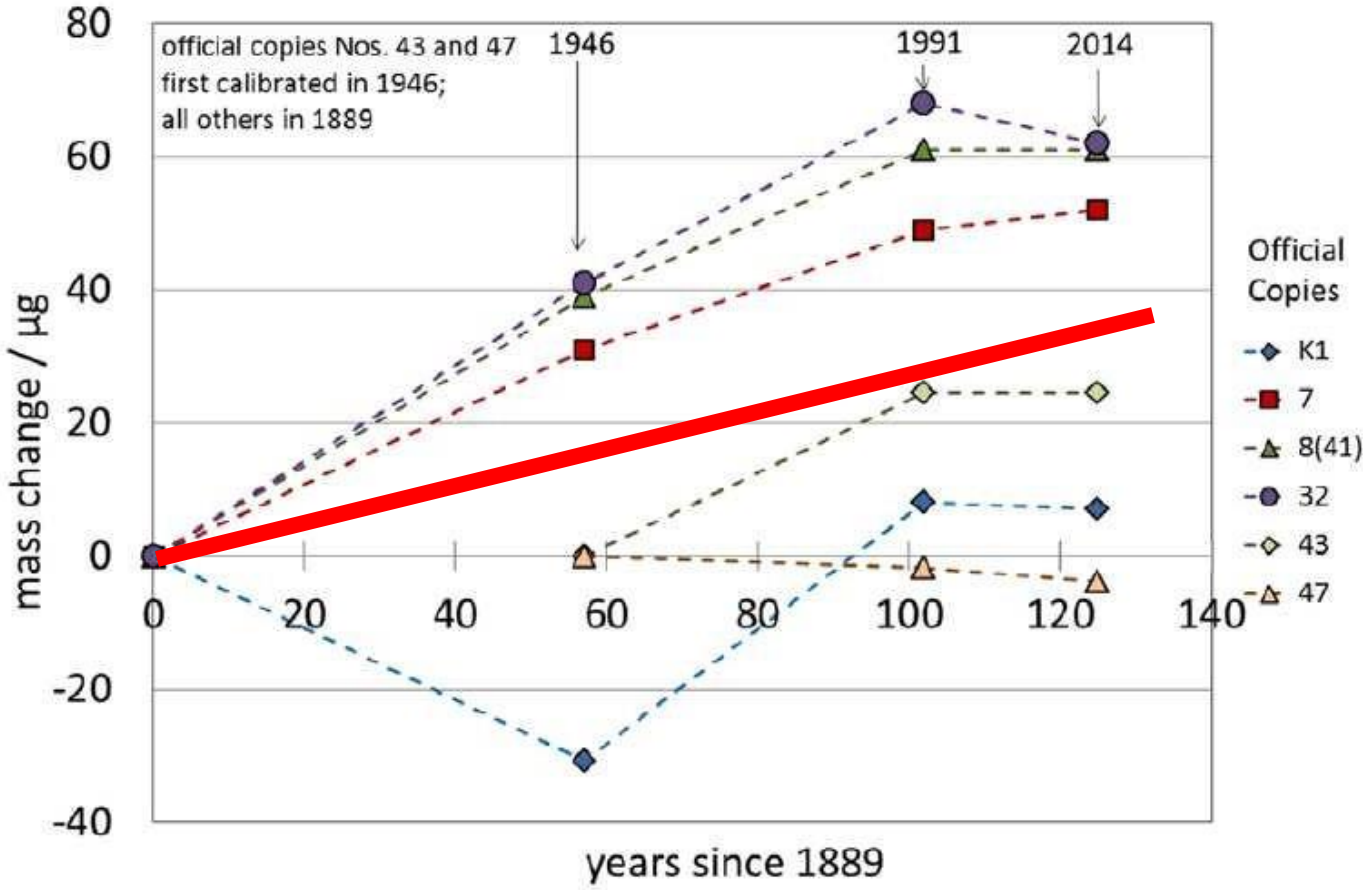
Único artefacto material todavía utilizado hoy para definir una unidad de base del SI



El prototipo internacional del kilogramo $\mathcal{K}$(IPK) y sus seis copias oficiales, *témoins*

Bureau International des Poids et Mesures

Se saca dos o tres veces por siglo para efectuar una comparación de masa



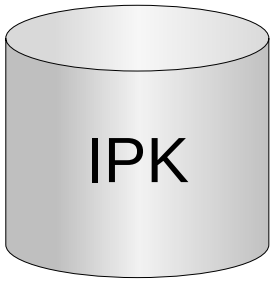
Última comparación de IPK con sus copias oficiales en 2014

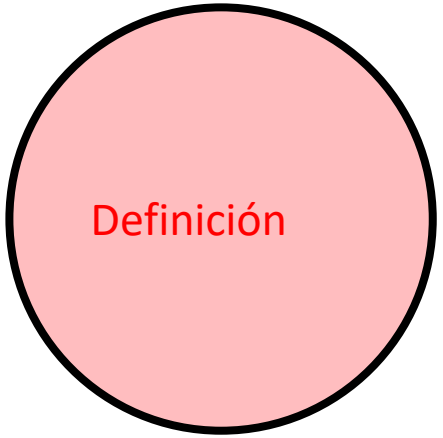
35 µg de diferencia corresponden a $3{,}5 \times 10^{-8}$ en valor relativo

Bureau International des Poids et Mesures

Definiciones y Realizaciones: el kilogramo

$$\frac{h}{m}$$





La definición
Lo que entendemos por “un kilogramo”

Realización
Cómo traducimos ese significado en términos prácticos

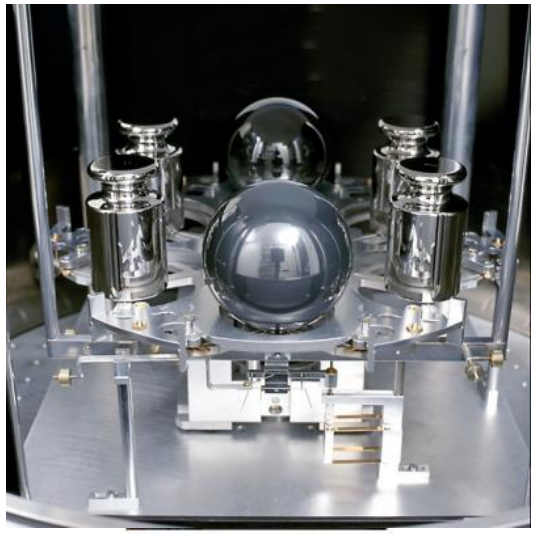
Bureau International des Poids et Mesures

El problema del kilogramo

- **Como reemplazar a IPK?**
  - Es difícil

- **Opción#1**
  - **Una receta para fabricar artefactos de masa conocida**
  - Construir una esfera con ^{28}Si puro, medir su talla y deducir el número de átomos en la esfera
  - Es el Proyecto Avogadro

- **Opción#2**
  - Encontrar una manera de medir la masa en función de algo que no sea una masa
  - Medir fuerzas gravitacionales en función de fuerzas eléctricas
  - Es la balanza de potencia, Watt Balance, ahora llamada balanza de Kibble, que mide el cociente h/M



Bryan Kibble
1939 - 2016

Definiciones y Realizaciones: el amperio

Un amperio es la corriente constante que, mantenida en dos conductores rectos paralelos de longitud infinita, de sección circular despreciable, y colocados a un metro de distancia en el vacío, produciría entre estos conductores una fuerza igual a 2×10^{-7} newton por metro de longitud.

Combinación del Efecto Hall cuántico y del efecto Josephson y las matrices de union Josephson

$$K_J = 2e/h$$

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

Definición

Realización

La definición

Lo que entendemos por “un amperio”

Realización

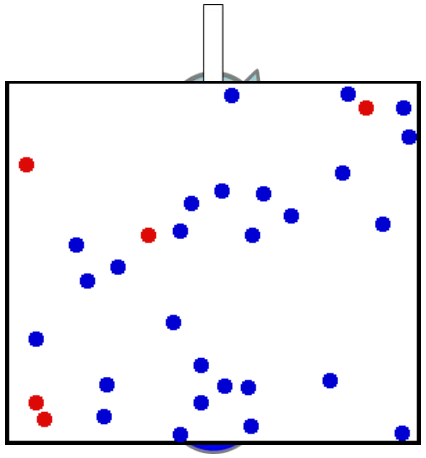
Cómo traducimos ese significado en términos prácticos

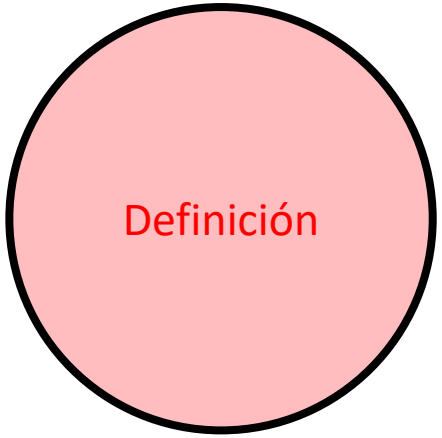
Bureau International des Poids et Mesures

Definiciones y Realizaciones: el kelvin

Cuántos julios de energía poseen las moléculas a una temperatura concreta?

k



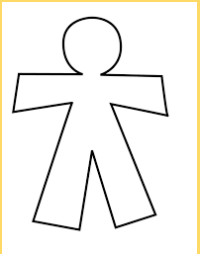


La definición
Lo que entendemos por “un kelvin”

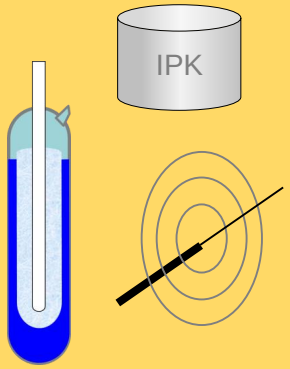
Realización
Cómo traducimos ese significado en términos prácticos

Evolución del SI

Definiciones de unidades en términos de



-kilogramo
-metro
-kelvin



miden

Constantes fundamentals de la naturaleza

- *constante de Planck,* h
- *constante de Boltzmann,* k
- *carga del electrón,* e

Bureau International des Poids et Mesures

Evolución del SI

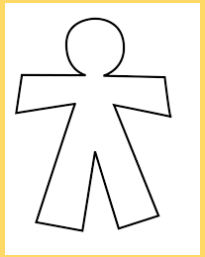
Definiciones de unidades en términos de

Constantes fundamentals de la naturaleza

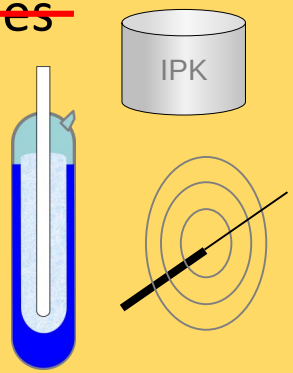
- *constante de Planck,* h
- *constante de Boltzmann,* k
- *carga del electrón,* e

realizan

~~Definiciones de unidades~~



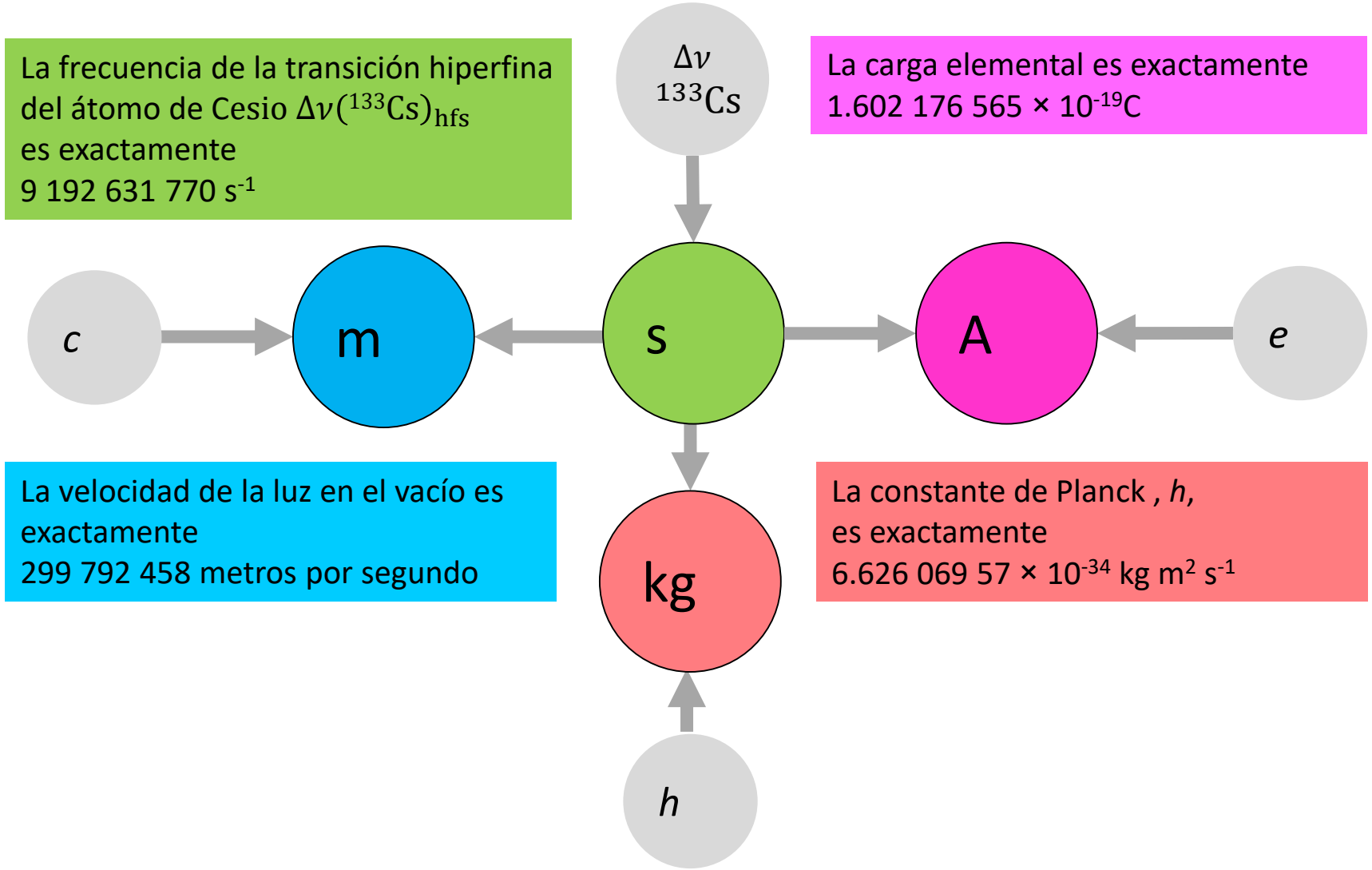
-kilogramo
-metro
-kelvin



Bureau International des Poids et Mesures

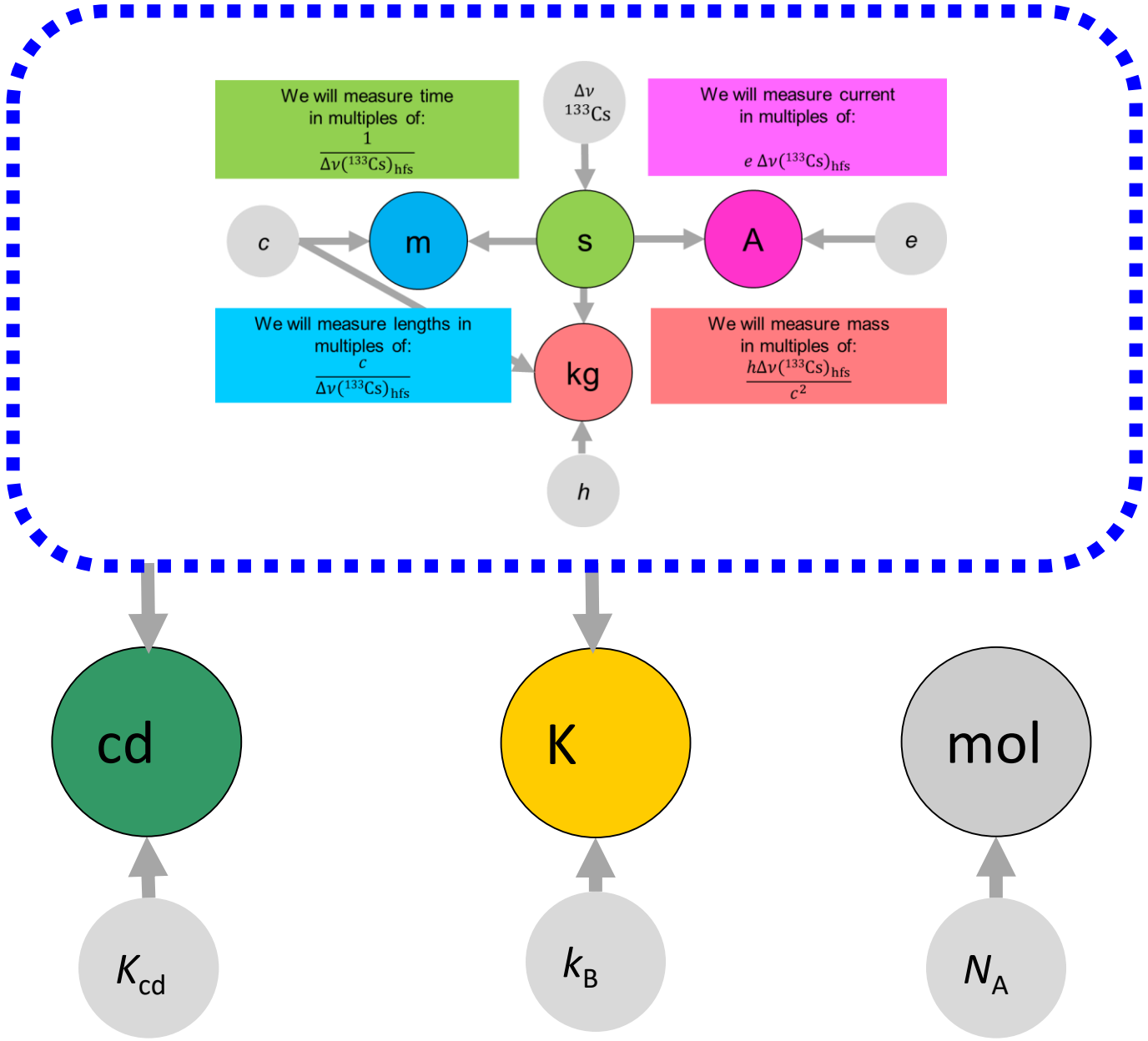
El Sistema internacional revisado…

…es el sistema de unidades en el cual



Bureau International des Poids et Mesures

Las tres otras unidades del SI

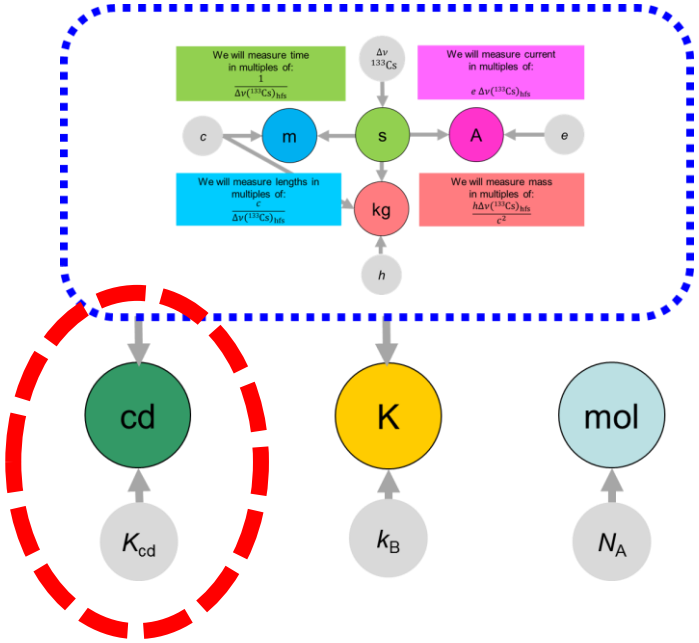


MKSA =
metro-kilogramo-segundo-amperio

Bureau International des Poids et Mesures

La ‘nueva’ candela…

El cocepto basico se mantiene



K_{cd} se indica ahora como una constant “explícita”

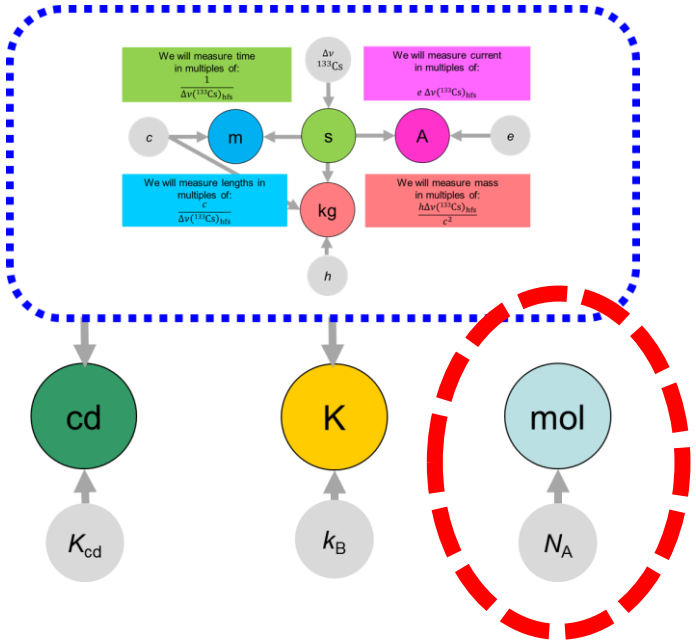
La eficacia luminosa, K_{cd}, para radiación monocromática de frecuencia 540 × 10^{12} Hz es exactamente 683 when se expresa en la unidad del SI cd·sr/W = lm/W

La característica de interés de la candela es que está vinculada a la percepción humana, que es susceptible de variar de una persona a otra.

Bureau International des Poids et Mesures

El ‘nuevo’ mol…

La redefinición del mol es una consecuencia de la redefinición del kilogramo



Antes:

- **The number of atoms in 12 g of ^{12}C**

Nueva definición:

- **N_A partículas elementares con N_A = 6.022 141 29 ×10^{23} *exactamente***

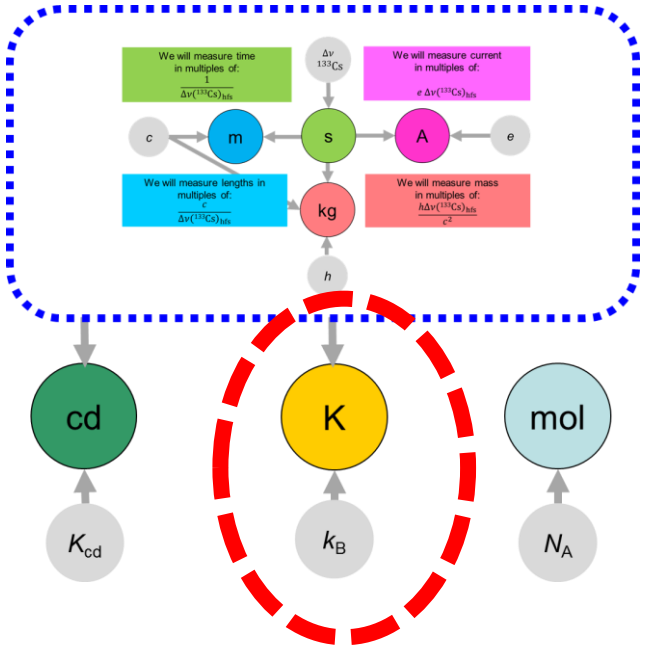
- Reconoce que la química es estequiometría, no medición de masa

- Lo que antes era la definición del mol – una medida de masa- ahora es una técnica para relizar el mol

Bureau International des Poids et Mesures

El “nuevo” kelvin

La redefinición vincula el kelvin con el concepto de energía molecular



Antes:

- T_{TPW} = 273.16 K ***exactamente***

Nueva definición:

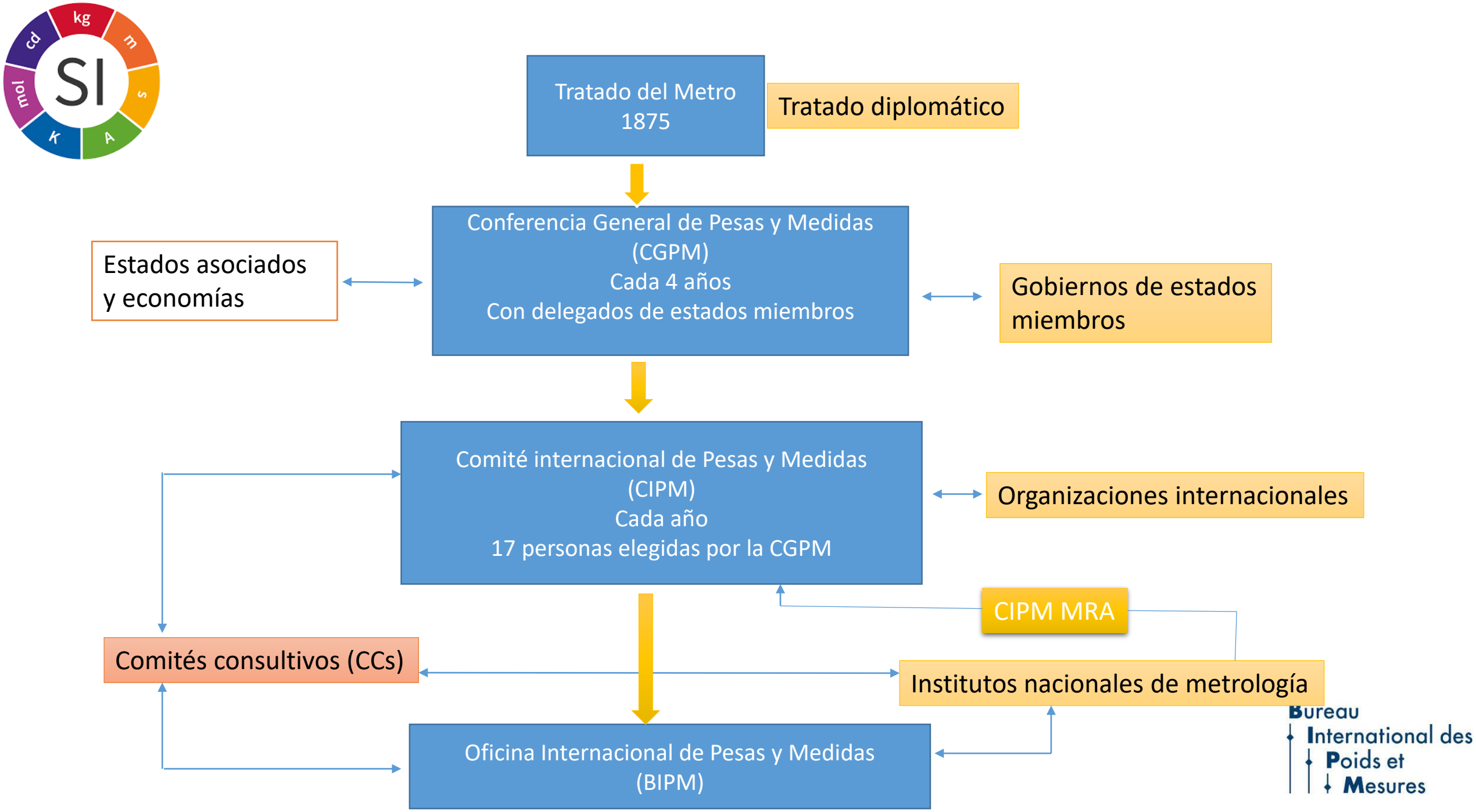
- k_B = 1.380 648 52 × 10^{-23} julios por kelvin ***exactamente***
- $N_A \times k_B = R$ = 8.314 459 86 julios por kelvin por mol ***exactamente***

  - Reconoce la naturaleza estadística de la temperatura
  - Medidas de temperatura desligadas de T_{TPW}

Bureau International des Poids et Mesures

Aspectos Institucionales

Bureau International des Poids et Mesures


SI
kg
m
s
A
K
mol
cd
Tratado del Metro
1875
Tratado diplomático
Conferencia General de Pesas y Medidas
(CGPM)
Cada 4 años
Con delegados de estados miembros
Estados asociados
y economías
Gobiernos de estados
miembros
Comité internacional de Pesas y Medidas
(CIPM)
Cada año
17 personas elegidas por la CGPM
Organizaciones internacionales
CIPM MRA
Comités consultivos (CCs)
Institutos nacionales de metrología
Oficina Internacional de Pesas y Medidas
(BIPM)
Bureau
International des
Poids et
Mesures

Solicitud de la CGPM a CODATA sobre el ajuste de las constantes para la redefinición

- **Resolución 1 de la 24ª CGPM (2011) :**

  The General Conference on Weights and Measures

  invites

  - CODATA to continue to provide adjusted values of the fundamental physical constants based on all relevant information available and to make the results known to the International Committee through its Consultative Committee for Units since these CODATA values and uncertainties will be those used for the revised SI,

- **Decisión CIPM/104-9 (2015)**: The CIPM revised its Decision CIPM/103-30 and decided that experimental results to be used by the CODATA Task Group on Fundamental Constants in the evaluation of the fundamental constants leading to the fixed values for the defining constants of the new SI should be accepted for publication by **1 July 2017**

Bureau International des Poids et Mesures

CODATA

1966- ICSU establece el “Committee on Data for Science and Technology (CODATA)”

- Para reforzar la ciencia internacional para el beneficio de la sociedad gracias a la promoción de los avances científicos y técnicos en el procesamiento de datos

1969 CODATA establece el “Task Group on Fundamental Constants (CODATA TGFC)”

- Para que periódicamente proporcione a las comunidades científicas y tecnológicas con un set auto-consistente de recomendaciones internacionales de los valores de las constantes básicas y factores de conversión de la física y la química basado en todos los resultados relevantes disponibles en el momento.

Bureau International des Poids et Mesures

OPEN ACCESS
IOP Publishing | Bureau International des Poids et Mesures
Metrologia
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[1], F Cabiati, J Fischer, K Fujii, S G Karshenboim, H S Margolis, 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

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

Abstract

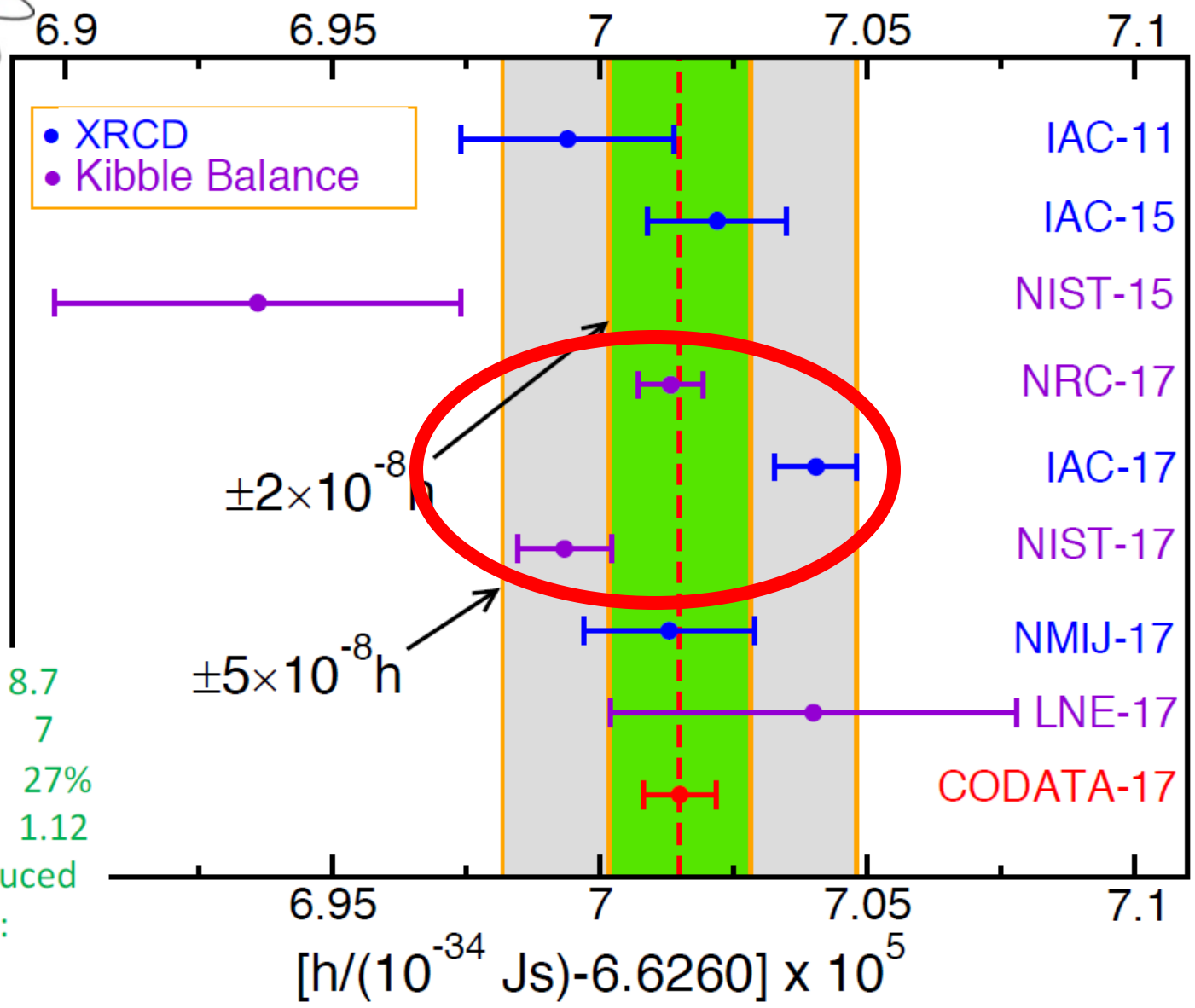
Sufficient progress towards redefining the International System of Units (SI) in terms of exact values of fundamental constants has been achieved. Exact values of the Planck constant h, elementary charge e, Boltzmann constant k, and Avogadro constant N_A from the CODATA 2017 Special Adjustment of the 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)

Bureau International des Poids et Mesures

2017 Planck constant



χ^2: 8.7
DOF: 7
Prob. χ^2: 27%
R_B: 1.12
Max. reduced residuals: -1.4, 1.9

Bureau International des Poids et Mesures

RECOMMENDATION OF THE CONSULTATIVE COMMITTEE FOR MASS AND RELATED QUANTITIES SUBMITTED TO THE INTERNATIONAL COMMITTEE FOR WEIGHTS AND MEASURES

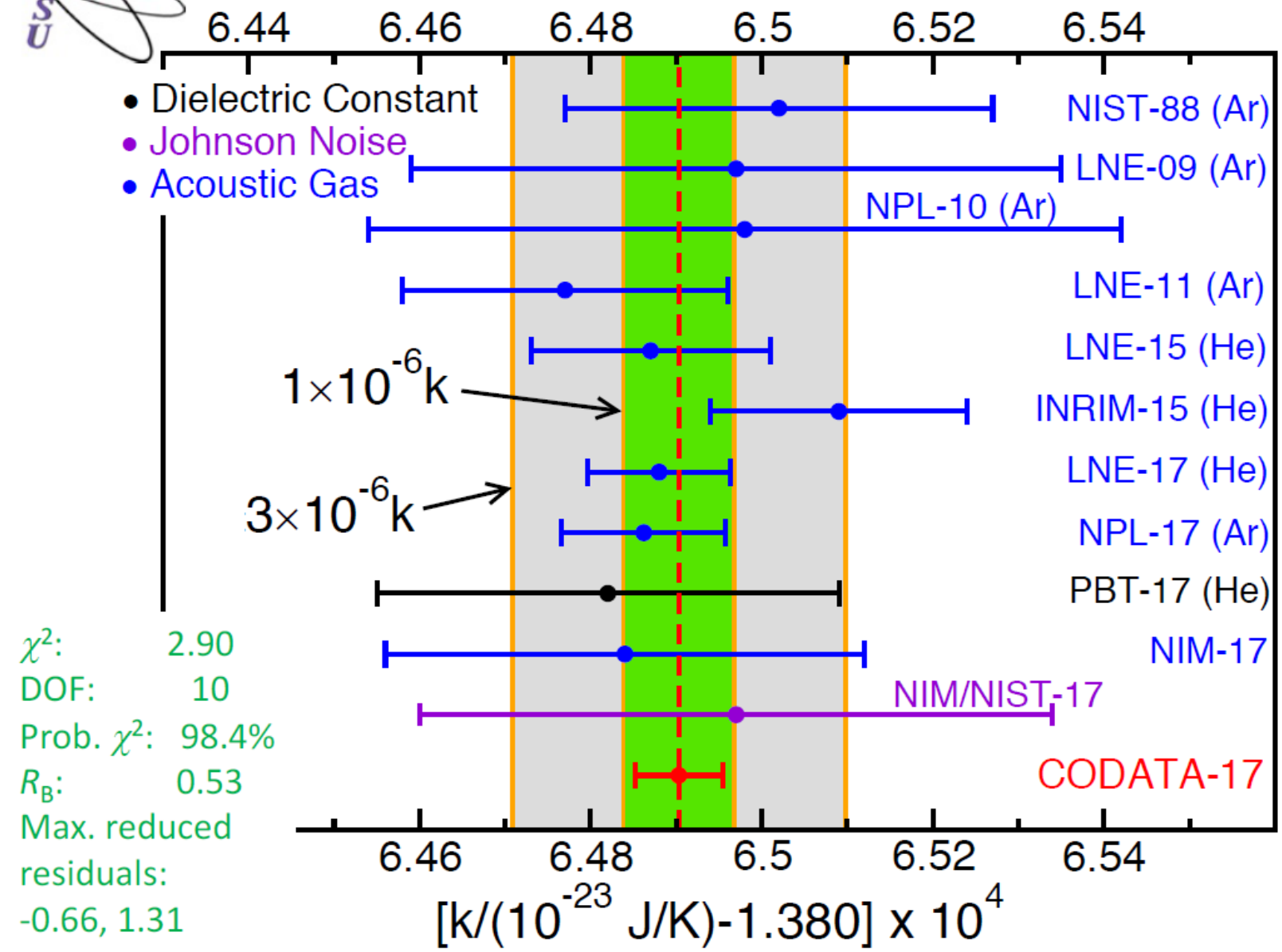
RECOMMENDATION G 1 (2017)
For a new definition of the kilogram in 2018 (publicly available at the CCM webpage)

noting that the CCM will conduct an on-going key comparison of primary realizations of the kilogram that will capture and maintain a table of the experimental degrees of equivalence, which can be used to create a formal procedure for applying corrections relative to the consensus value,

requests those National Metrology Institutes having a realization of the kilogram to avail themselves of the consensus value (as determined from the ongoing comparison) when disseminating the unit of mass according to the new definition, until the dispersion in values becomes compatible with the individual realization uncertainties, thus preserving the international equivalence of calibration certificates and in accordance with the principles and agreed protocols of the CIPM Mutual Recognition Arrangement,

recommends that the CIPM undertakes the necessary steps to proceed with the planned redefinition of the SI at the next meeting of the CGPM, acknowledging the measures to be taken by the CCM to ensure integrity and continuity in the dissemination of the kilogram.

2017 Boltzmann constant



Slide from CODATA

Bureau International des Poids et Mesures

Valores de h, e, k y N_A ajustados por CODATA en 2017

Quantity	Value	Rel. stand. uncert u_r
h	$6.626\,070\,150(69) \times 10^{-34}$ J s	1.0×10^{-8}
e	$1.602\,176\,6341(83) \times 10^{-19}$ C	5.2×10^{-9}
k	$1.380\,649\,03(51) \times 10^{-23}$ J K^{-1}	3.7×10^{-7}
N_A	$6.022\,140\,758(62) \times 10^{23}$ mol^{-1}	1.0×10^{-8}

Bureau International des Poids et Mesures

El 20 de Mayo 2019

Quantity	Value
h	$6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$ J s
e	$1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$ C
k	$1.380\,649 \times 10^{-23}$ J K^{-1}
N_A	$6.022\,140\,76 \times 10^{23}$ mol^{-1}

Bureau International des Poids et Mesures

Determinación por CODATA de los valores exactos de h, e, k y N_A

- Resolución 1 de la 24ª CGPM (2011)
  - The values of $m(\mathcal{K})$, μ_0, T_{TPW}, and $M(^{12}\mathrm{C})$ remain consistent with their exact values in present SI

- Decisión CIPM/105-15 of the 105th CIPM (2016)
  - The exact values of h, e, and N_A are chosen such that $m(\mathcal{K})$, μ_0, and $M(^{12}\mathrm{C})$ remain consistent within their relative standard uncertainties.
  - The exact value of k is chosen such that T_{TPW} remains consistent at the level it can be presently realized

Bureau International des Poids et Mesures

Continuidad entre el SI revisado y el actual

Consistency from present SI to revised SI

- **International prototype of the kilogram:**

  $m(\mathcal{K})/1\ \mathrm{kg} = 1.000\ 000\ 000(10)$

- **Permeability of vacuum:**

  $\mu_0/4\pi \times 10^{-7}\ \mathrm{H\ m^{-1}} = 1.000\ 000\ 000\ 20(23)$

- **Triple point of water:**

  $T_{\mathrm{TPW}}/273.16\ \mathrm{K} = 1.000\ 000\ 02(37)$

- **Molar mass of the carbon 12 atom:**

  $M(^{12}\mathrm{C})/0.012\ \mathrm{kg\ mol^{-1}} = 1.000\ 000\ 000\ 37(45)$

Bureau International des Poids et Mesures

Borrador de la Resolución A que será votada en la 26ª CGPM sobre la adopción de la redefinición del SI

Draft Resolution A to be presented to the 26th CGPM 2018

The International System of Units (SI)

The 26th General Conference,

considering

- the essential requirement for an International System of Units (SI) that is uniform and accessible world-wide for international trade, high-technology manufacturing, human health and safety, protection of the environment, global climate studies and the basic science that underpins all these,
- that the SI units must be stable in the long term, internally self-consistent and practically realizable being based on the present theoretical description of nature at the highest level,
- that a revision of the SI to meet these requirements was described in Resolution 1 of the 24th General Conference in 2011, adopted unanimously, that laid out in detail a new way of defining the SI based on a set of seven defining constants, drawn from the fundamental constants of physics and other constants of nature, from which the definitions of the seven base units are deduced,
- that the conditions set by the 24th General Conference, confirmed by the 25th General

distribution

Bureau International des Poids et Mesures

decides

that, effective from 20 May 2019, the International System of Units, the SI, is the system of units in which

- the unperturbed ground state hyperfine transition frequency of the caesium 133 atom $\Delta\nu_{Cs}$ is 9 192 631 770 Hz,
- 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 $1.380\ 649 \times 10^{-23}$ J/K,
- the Avogadro constant N_A is $6.022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ mol^{-1},
- the luminous efficacy of monochromatic radiation of frequency 540×10^{12} Hz, K_{cd}, is 683 lm/W,

where the hertz, joule, coulomb, lumen, and watt, with unit symbols Hz, J, C, lm, and W, respectively, are related to the units second, metre, kilogram, ampere, kelvin, mole, and candela, with unit symbols s, m, kg, A, K, mol, and cd, respectively, according to Hz = s^{-1}, J = m^2 kg s^{-2}, C = A s, lm = cd m^2 m^{-2} = cd sr, and W = m^2 kg s^{-3},

DRAFT not for

Appendix 1. Abrogation of former definitions of the base units:

It follows from the new definition of the SI adopted above that

- the definition of the second in force since 1967/68 (13th meeting of the CGPM, Resolution 1) is abrogated,
- the definition of the metre in force since 1983 (17th meeting of the CGPM, Resolution 1), is abrogated,
- the definition of the kilogram in force since 1889 (1st meeting of the CGPM, 1889, 3rd meeting of the CGPM, 1901) based upon the mass of the international prototype of the kilogram is abrogated,
- the definition of the ampere in force since 1948 (9th meeting of the CGPM) based upon the definition proposed by the International Committee (CIPM, 1946, Resolution 2) is abrogated,
- the definition of the kelvin in force since 1967/68 (13th meeting of the CGPM, Resolution 4) is abrogated,
- the definition of the mole in force since 1971 (14th meeting of the CGPM, Resolution 3) is abrogated,
- the definition of the candela in force since 1979 (16th meeting of the CGPM, Resolution 3) is abrogated,
- the decision to adopt the conventional values of the Josephson constant K_{J-90} and of the von Klitzing constant R_{K-90} taken by the International Committee (CIPM, 1988, Recommendations 1 and 2) at the request of the General Conference (18th meeting of the CGPM, 1987, Resolution 6) for the establishment of representations of the volt and the ohm using the Josephson and quantum Hall effects, respectively, is abrogated.

DRAFT not for distribution

Appendix 2. Status of constants previously used in the former definitions:

It follows from the new definition of the SI adopted above, and from the recommended values of the 2017 special CODATA adjustment on which the values of the defining constants are based, that at the time this Resolution was adopted

- the mass of the international prototype of the kilogram $m(K)$ is equal to 1 kg within a relative standard uncertainty equal to that of the recommended value of h at the time this Resolution was adopted, namely 1.0×10^{-8} and that in the future its value will be determined experimentally,

- the vacuum magnetic permeability μ_0 is equal to $4\pi \times 10^{-7}$ H m^{-1} within a relative standard uncertainty equal to that of the recommended value of the fine-structure constant α at the time this Resolution was adopted, namely 2.3×10^{-10} and that in the future its value will be determined experimentally,

- the thermodynamic temperature of the triple point of water T_{TPW} is equal to 273.16 K within a relative standard uncertainty closely equal to that of the recommended value of k at the time this Resolution was adopted, namely 3.7×10^{-7}, and that in the future its value will be determined experimentally,

- the molar mass of carbon 12, $M(^{12}C)$, is equal to 0.012 kg mol^{-1} within a relative standard uncertainty equal to that of the recommended value of $N_A h$ at the time this Resolution was adopted, namely 4.5×10^{-10}, and that in the future its value will be determined experimentally.

Bureau International des Poids et Mesures

Appendix 3. The base units of the SI

Starting from the definition of the SI adopted above in terms of fixed numerical values of the defining constants, definitions of each of the seven base units are deduced by taking, as appropriate, one or more of these defining constants to give the following set of definitions:

- The second, symbol s, is the SI unit of time. It is defined by taking the fixed numerical value of the caesium frequency $\Delta\nu_{Cs}$, the unperturbed ground-state hyperfine transition frequency of the caesium 133 atom, to be 9 192 631 770 when expressed in the unit Hz, which is equal to s^{-1}.

- The metre, symbol m, is the SI unit of length. It is defined by taking the fixed numerical value of the speed of light in vacuum c to be 299 792 458 when expressed in the unit m/s, where the second is defined in terms of the caesium frequency $\Delta\nu_{Cs}$.

- The kilogram, symbol kg, is the SI unit of mass. It is defined by taking the fixed numerical value of the Planck constant h to be $6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ when expressed in the unit J s, which is equal to kg m^2 s^{-1}, where the metre and the second are defined in terms of c and $\Delta\nu_{Cs}$.

- The ampere, symbol A, is the SI unit of electric current. It is defined by taking the fixed numerical value of the elementary charge e to be $1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ when expressed in the unit C, which is equal to A s, where the second is defined in terms of $\Delta\nu_{Cs}$.

- The kelvin, symbol K, is the SI unit of thermodynamic temperature. It is defined by taking the fixed numerical value of the Boltzmann constant k to be $1.380\ 649 \times 10^{-23}$ when expressed in the unit J K^{-1}, which is equal to kg m^2 s^{-2} K^{-1}, where the kilogram, metre and second are defined in terms of h, c and $\Delta\nu_{Cs}$.

- The mole, symbol mol, is the SI unit of amount of substance. One mole contains exactly $6.022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ elementary entities. This number is the fixed numerical value of the Avogadro constant, N_A, when expressed in the unit mol^{-1} and is called the Avogadro number.

The amount of substance, symbol n, of a system is a measure of the number of specified elementary entities. An elementary entity may be an atom, a molecule, an ion, an electron, any other particle or specified group of particles.

- The candela, symbol cd, is the SI unit of luminous intensity in a given direction. It is defined by taking the fixed numerical value of the luminous efficacy of monochromatic radiation of frequency 540×10^{12} Hz, K_{cd}, to be 683 when expressed in the unit lm W^{-1}, which is equal to cd sr W^{-1}, or cd sr kg^{-1} m^{-2} s^3, where the kilogram, metre and second are defined in terms of h, c and $\Delta\nu_{Cs}$.

DRAFT not for distribution

ureau International des Poids et Mesures

SI Brochure (Folleto del SI)

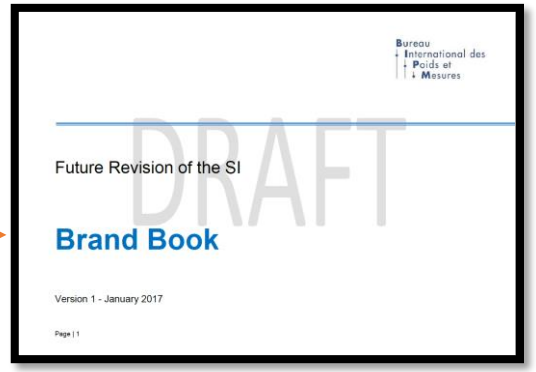
9ª edición explicando la redefinición oficial y pública el 20 de Mayo de 2019

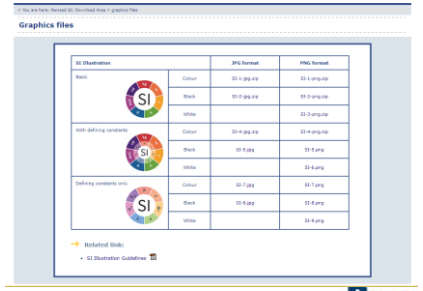
Borrador disponible en https://www.bipm.org/utils/en/pdf/si-revised-brochure/Draft-SI-Brochure-2018.pdf

Bureau International des Poids et Mesures

http://www.bipm.org/en/si-download-area/

Enlaces a vídeos y documentos sobre la redefinición para público general





Bureau International des Poids et Mesures

Después de la redefinición del SI

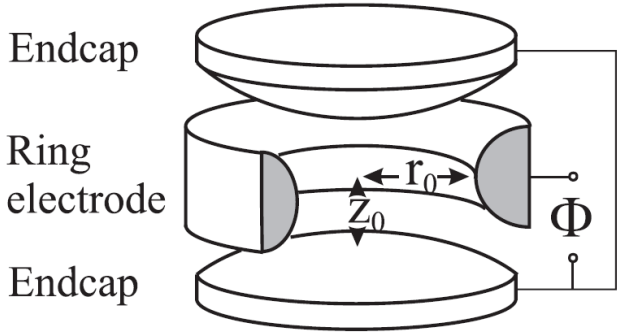
Bureau International des Poids et Mesures

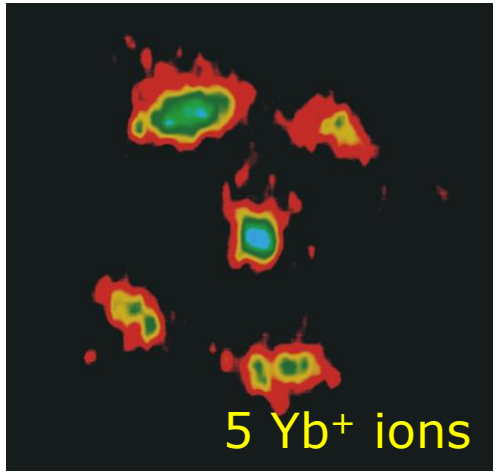
Redefinición del segundo

- Los relojes ópticos están ahora superando en precisión y estabilidad a los estándar de cesio y microondas
- Se plantea la cuestión de si el segundo del SI debería ser redefinido usando una transición óptica

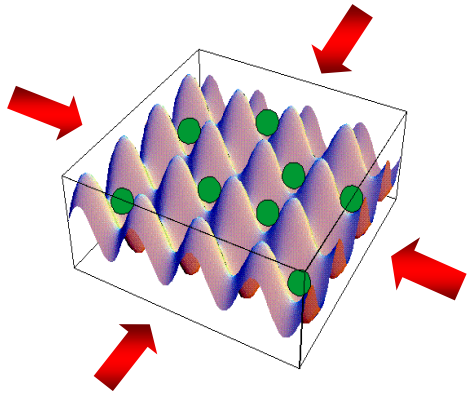
Iones aislados en una trampa iónica

Single ion clock





Átomos neutros en redes ópticas 3D

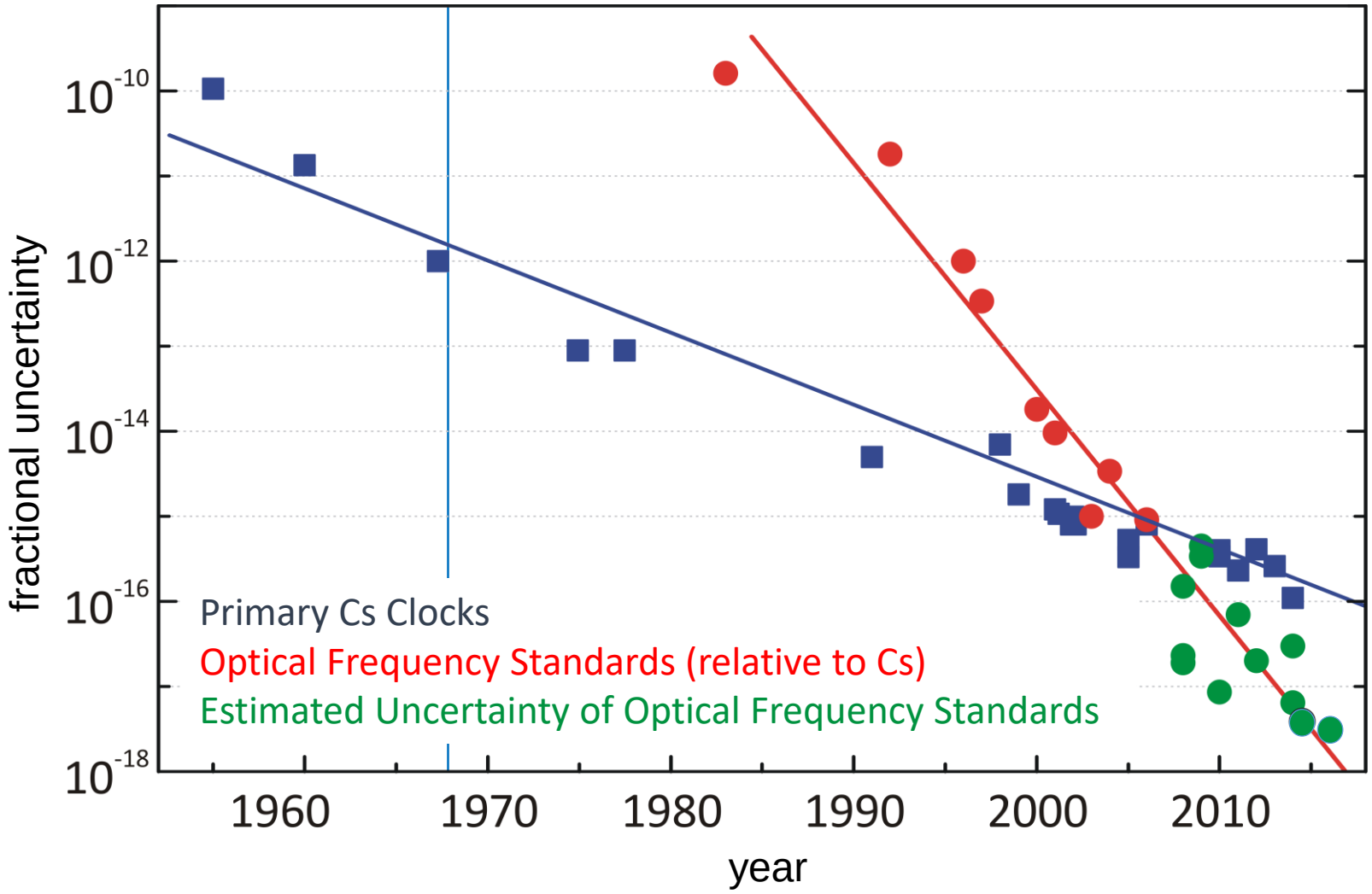


- 10^4 – 10^6 átomos interrogados

Candidatos bajo estudio: Al^+, $Hg^{+/2+}$,Hg, Sr, $Sr^{+/2+}$, $In^{+/3+}$, Mg, Ca, Ca+, $Yb^{+/2+/3+}$, Yb and $Th^{+/3+}$

Bureau International des Poids et Mesures

Relojes de Cesio versus relojes opticos atómicos



Bureau International des Poids et Mesures

Hoja de ruta para la redefinición del segundo

> 3 different clocks
$\Delta\nu_i/\nu_i \sim 10^{-18}$

> 3 comparisons
$\Delta(\nu_i/\nu_i) < 5 \times 10^{-18}$

> 3 comp. vs Cs
$\Delta\nu/\nu < 3 \times 10^{-16}$

Regular contribut. to TAI

2 comp. between 5 clocks
$\Delta(\nu_i/\nu_k) / (\nu_i/\nu_k) < 5 \times 10^{-18}$

Validation and decision for optical standard

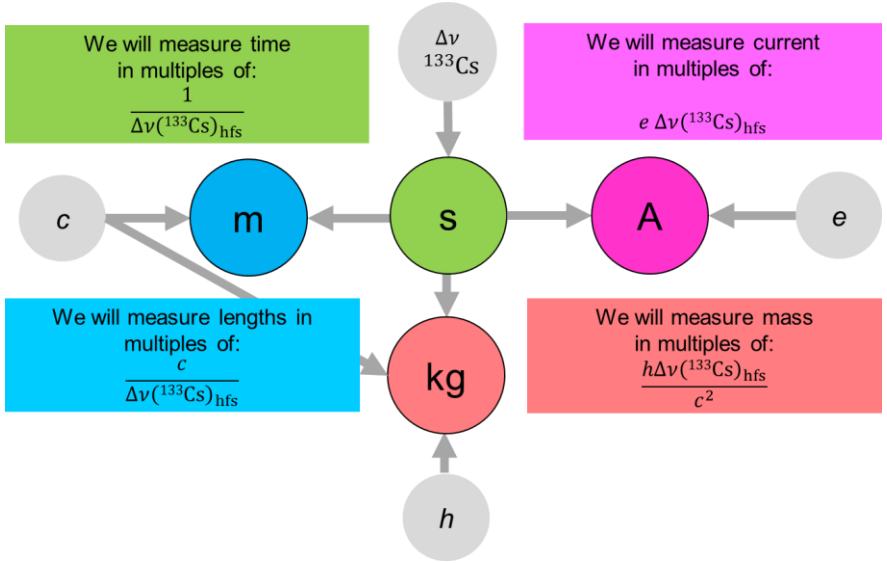
CGPM

2017 2020 2025 2030

Scheme from Fritz Riehle, CCTF

Bureau International des Poids et Mesures

Conclusión y perspectivas



La definiciones de las unidades en el SI revisado

- Explicitan el valor de constantes naturales
- Su abstracción abre la posibilidad de mejorar la tecnología de realización de las unidades sin afectar a la definición
- El “problema” del amperio queda resuelto
- El “problema” del kilogramo queda resuelto

Bureau International des Poids et Mesures

Las constantes fundamentales, “*pour tous les temps, pour tous les hommes*”

Bureau International des Poids et Mesures