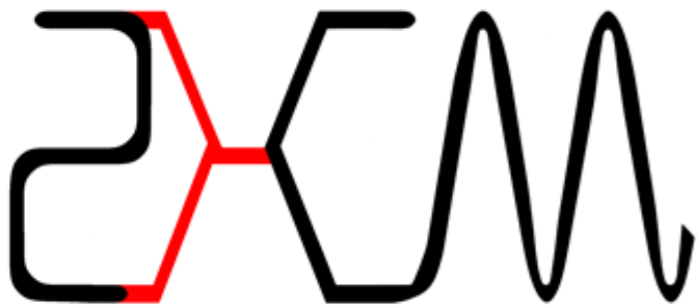


CANVI DE DEFINICIONS DEL SISTEMA INTERNACIONAL D'UNITATS

Maite Pueyo Vigatà, SCM



SECCIÓ CATALANA DE METROLOGIA

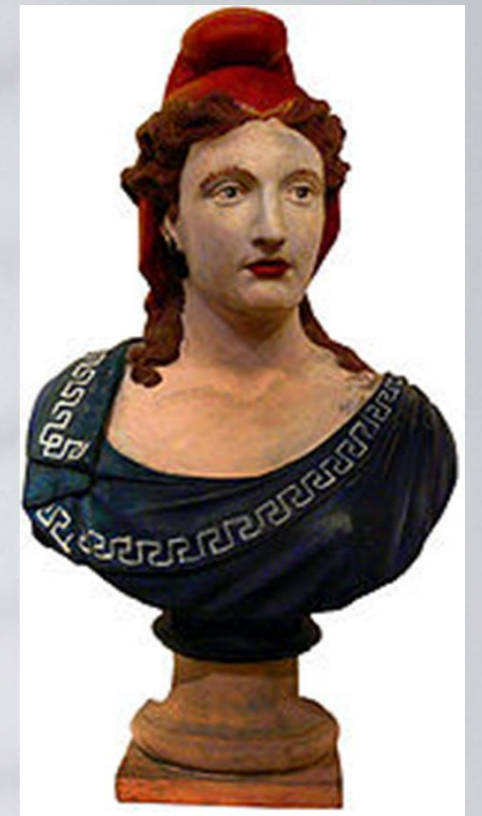
21 de maig 2019

CCCB Barcelona



El sistema mètric decimal és una aportació de la república francesa.

El 1790 l'Assemblée Nationale, proposa la creació d'un nou sistema d'unitats "estable, uniforme i simple".



En resposta a peticions registrades en nombrosos "Cahiers de doléances" (*llibre de reclamacions*)

- queixant-se d'abusos feudals en la manipulació de les unitats censals i
- demandant de reduir-les totes a la del rei.



Per assegurar l'estabilitat d'aquest sistema de mesures (per exemple, per canvi de nació o rei), se li va donar una dimensió internacional. D'aquesta forma ni el rei ni el govern podien alterar les mesures, evitant abusos.

Des de llavors, els científics sempre han estat a la recerca de la millor forma de definir les unitats. Cada època ha permès trobar una definició en concordança amb els coneixements científics del moment.

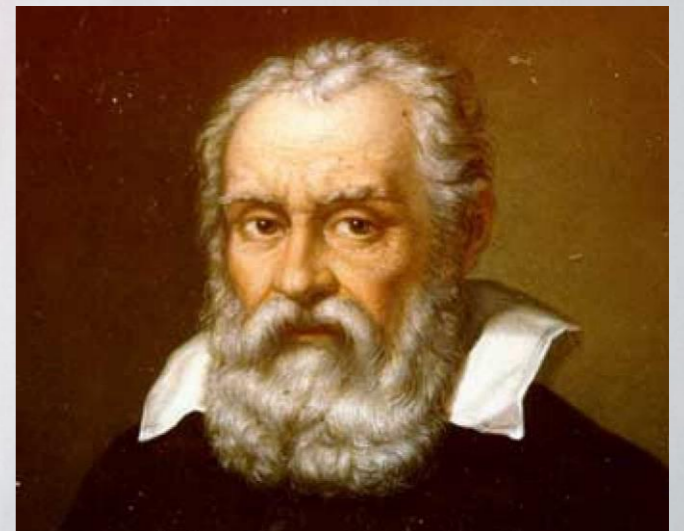
Per començar, el primer sistema d'unitats es basava en el **kilogram** i el **metre**.



La primera definició de la unitat de longitud fou a partir del pèndol (dissenyat per Galileu Galilei).

La longitud d'un pèndol amb un semiperíode d'un segon amb l'acceleració estàndard de la gravetat $g = 9,80665 \text{ m/s}^2$ és igual a:

$$l = \frac{T^2 g}{4\pi^2} = 0,993621 \text{ m}$$





Perquè en aquesta definició es parla de semiperíode, i no període?

Es busca un resultat que correspongui a una unitat "humana" de l'ordre del doble del colze, del triple del peu, meitat de la braça, i dos terços de la (doble) passa.

Hem passat d'una definició "humana" de la unitat de longitud a una definició "terràquüia" de la unitat, però n'hem mantingut (aproximadament) el valor, tot i refinar molt la definició i la seva precisió.



REDEFINIR I REFINAR

Aquest és el principi bàsic que sempre s'ha seguit a l'hora de trobar noves definicions de les unitats: **millorar la seva definició i precisió, mantenint el seu valor.**

- no canviar perquè sí
- mantenir constant el valor de la unitat quan es canvia, dins de la incertesa





FITES DESTACABLES

- 1791, l'Assemblée Nationale decideix definir la unitat de Longitud en base a l'arc de meridià i no al pèndol.
- 1793 es formalitza la definició de la unitat de massa (*grave*) com a massa d'un decímetre cúbic d'aigua destil·lada a la temperatura del gel fonent (màxima estabilitat de la temperatura).

$$\Delta\rho_t = \frac{\partial\rho}{\partial t} \Delta t$$



FITES DESTACABLES

El juny del 1799 queden ratificats i dipositats els patrons materials del metre i kilogram «dels Arxius», amb voluntat de ser internacionals.

Com es veurà diverses ocasions:

hi ha diferència entre la definició de la unitat i la seva realització, perquè una cosa és la longitud d'una part de meridià i una altra la longitud d'una barra metàl·lica.

En aquest cas concret, el metre dels Arxius és de l'ordre de $3 \cdot 10^{-4}$ més curt que la fracció prevista del meridià.



FITES DESTACABLES

El 20 de maig del 1875, s'aprova la Convenció del Metre i els seus organismes relacionats (BIPM, CIPM, CGPM) amb la intenció de proporcionar les bases d'un únic sistema de mesures coherent i que es faci servir en tot el món.

En aquest moment també es decideixen uns nous patrons materials de metre i kilogram, fets d'un material millor: platí iridiat al 10%, fos.





FITES DESTACABLES

Les unitats elèctriques són desenvolupades al llarg del S. XVII (Faraday, Maxwell, Thomson, Wheastone...). En aquest moment també es crea un Congrés Elèctric encarregat de definir les unitats.

En paral·lel, també s'està treballant amb altres unitats com són, per exemple, el temps o la temperatura.





FITES DESTACABLES

1956: la CGPM estableix el Sistema Internacional d'Unitats, compost per : metre, kilogram, segon, ampere, grau Kelvin, candela.

És un sistema que, tècnicament correspon a la seva època, però que encara està basat en la ciència del segle XIX.

És al llarg del segle XX quan l'evolució de la ciència permet anar modificant la definició de les unitats i la seva materialització, mantenint sempre el mateix esperit, que és conèixer la definició amb una precisió millor i no alterar el seu valor inicial significativament.



FITES DESTACABLES

- L'any 1960 tenim la primera definició quàntica:

"El metre és la longitud igual a 1 650 763,73 longituds d'ona al buit de la radiació corresponent a la transició entre els nivells $2p_{10}$ i $5d_5$ de l'àtom de criptó 86."

- L'any 1968 es redefineix el segon, l'escala Kelvin i la candela.

- L'any 1971 entra el **mol** en el Sistema Internacional. En aquest moment ja conta de les 7 unitats que coneixem ara.



FITES DESTACABLES

- L'any 1983 es modifica la definició del metre, ara basada explícitament en una constant de la natura:

“El metre és la longitud del trajecte recorregut en el buit per la llum durant $1/299\,792\,458$ segons.”



EL SISTEMA INTERNACIONAL D'UNITATS

Magnitud	Símbol	Unitat bàsica	Símbol
Longitud	l	metre	m
Massa	m	kilogram	kg
Temps	t	segon	s
Corrent elèctric	I	ampere	A
Temperatura termodinàmica	T	kelvin	K
Quantitat de substància	n	mol	mol
Intensitat lluminosa	I_v	candela	cd



ACTUALITAT: 20 de maig de 2019

Es modifiquen les definicions de les 7 unitats del SI.

Antecedents:

Fins ara hi ha hagut una definició per a cada unitat bàsica i aquestes són el punt de partida per a la ciència.

Motivacions:

- la inestabilitat del patró del kilogram
- la necessitat de relligar les unitats elèctriques pràctiques al SI
- la necessitat de fonamentar millor el mol



ACTUALITAT: 20 de maig de 2019

Nou enfocament: ús de les constants fonamentals

- constants fonamentals, desvinculades de la Terra i dels humans
- les constants defineixen totes les unitats a la vegada
- la velocitat de la llum, la constant de Planck i altres constants sempre han tingut el mateix valor. Fixar el seu valor fa que quedin fixades les unitats que les expressen.



Així, si fins ara la definició de les unitats bàsiques del SI marcava el valor per a aquestes constants, ara, el valor fixat a les constants són les responsables de la definició de la unitat.



La imatge mostra la constant relacionada amb cada unitat.



Els valors fixats per a aquestes constants són:

- la freqüència de transició hiperfina de l'estat fonamental sense pertorbar de l'àtom de cesi 133 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ és 9 192 631 770 Hz,
- la velocitat de la llum al buit c és 299 792 458 m/s,
- la constant de Planck h és $6,626\ 070\ 040 \times 10^{-34}$ J s,
- la càrrega elemental e és $1,602\ 176\ 620\ 8 \times 10^{-19}$ C,
- la constant de Boltzmann k és $1,380\ 648\ 52 \times 10^{-23}$ J/K,
- la constant d'Avogadro N_A és $6,022\ 140\ 857 \times 10^{23}$ mol⁻¹,
- l'eficàcia lluminosa K_{cd} de la radiació monocromàtica de freqüència 540×10^{12} hertz és 683 lm/W.



Ja sabem que el SI s'ha revisat en diferents ocasions, però el redefinir 4 unitat bàsiques de cop no té precedents.

Aquestes redefinicions s'han fet tenint en compte que no provoquin cap impacte en el nostre dia a dia i que les mesures fetes amb les definicions anteriors segueixin essent vàlides.

Pocs usuaris notaran el canvi.



Quines unitats no canvien?

El segon, metre i candela. Ha canviat la redacció de la seva definició. Però no la definició de la unitat. Per exemple, pel segon, des de l'any 1968 la definició ha estat:

Es defineix com la duració de 9 192 631 770 períodes de radiació corresponents a la transició entre dos nivells de l'estructura hiperfina de l'estat fonamental del cesi 133.

Ara direm:

Queda definit prenent el valor numèric fix de la freqüència de la transició entre els dos nivells hiperfins de l'estat fonamental, sense pertorbar, de l'àtom de cesi-133 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ com a 9 192 631 770 quan s'expressa en la unitat Hz, que és igual a s^{-1} .



Quines unitats canvien?

L'ampere,

el kelvin,

el mol i

el kilogram.



L'AMPERE

Queda definit prenent el valor numèric fix de la càrrega elemental e com a $1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ quan s'expressa en la unitat C, que és igual a A·s, on el segon està definit en termes de $\Delta\nu_{Cs}$.

EL KELVIN

Queda definit prenent el valor numèric fix de la constant de Boltzmann k com a $1,380\ 649 \times 10^{-23}$ quan s'expressa en la unitat J·K, que és igual a $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, on el kilogram, metre i segon estan definits en termes de h , c i $\Delta\nu_{Cs}$.



EL MOL

Queda definit prenent el valor numèric fix de la constant d'Avogadro N_A com a $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ quan s'expressa en la unitat mol^{-1} .

El mol ja no depèn de la unitat de massa, sinó d'un nombre d'entitats.



EL KILOGRAM

Queda definit prenent el valor numèric fix de la constant de Planck h com a $6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ quan s'expressa en la unitat $\text{J}\cdot\text{s}$, que és igual a $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$, on el metre i el segon estan definits en termes de c i $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.



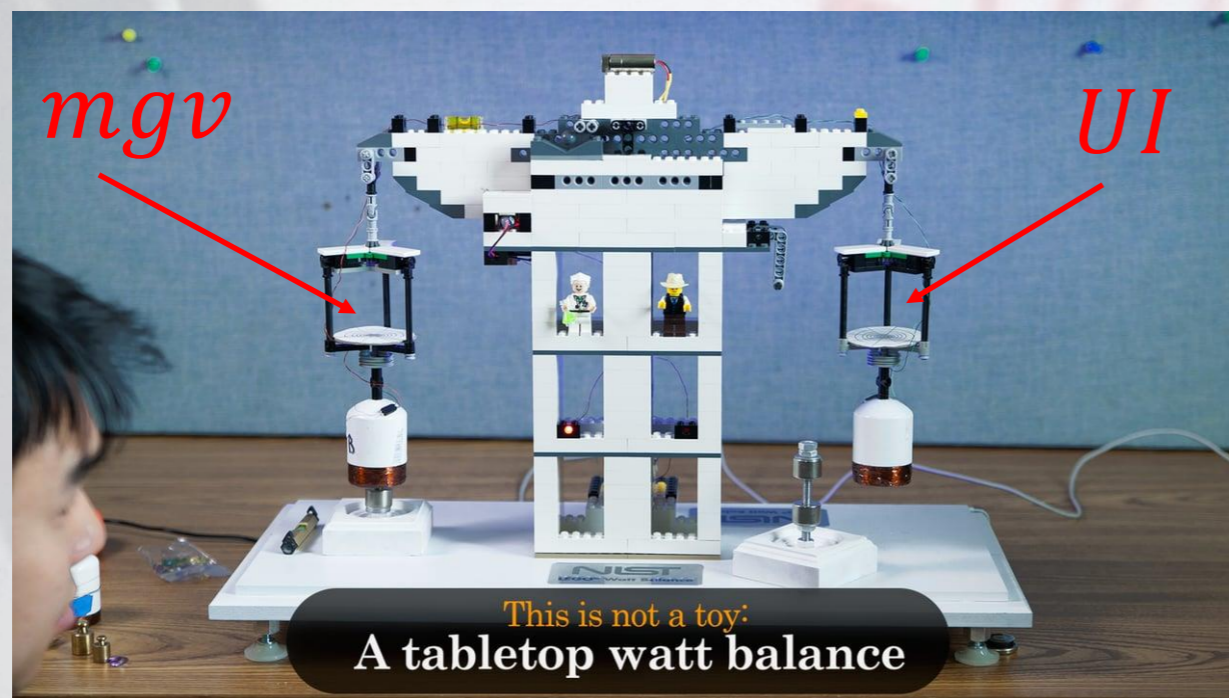
A partir d'aquestes noves definicions, els científics han de treballar per a materialitzar (realització pràctica) les unitats de forma que s'aconsegueixen patrons més estables i amb menor incertesa.

En alguns casos, la realització pràctica de la unitat ja està molt avançada (per exemple el kg), en d'altres (per exemple el kelvin), no tant.

Vegem, a continuació, com es pot fer una materialització del kilogram en termes de la constant de Planck, a partir de la balança de Kibble.

La balança de Kibble

Relació entre el kilogram i la constant de Planck



$$\begin{aligned}
 mgv &= UI \\
 &= n f_J \frac{1}{K_J} \frac{n' f'_J}{K_J r R_K} \\
 &= \frac{nn'}{r} f_J f'_J \frac{1}{K_J^2 R_K}
 \end{aligned}$$

<https://vimeo.com/128598681>

Éssent: n , n' i r múltiples dels efectes quàntics i f_J i f'_J les freqüències emprades en les unions Josephson



EL KILOGRAM : relació amb la constant de Planck

$$mgv = \frac{nn'}{r} f_J f'_J \frac{1}{K_J^2 R_K}$$

Coneixent que les constants K_J (Josephson) i R_K (von Klitzing) están en funció de h i e :

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

s'arriba a que:

$$m = \frac{nn'}{r} \frac{f_J f'_J}{gv} \frac{1}{4} h$$



AGRAÏMENTS

- A tots vosaltres per la vostra atenció
- Als companys/es de la Secció Catalana de Metrologia
- Al CCCB