

LES DEFINICIONS DE LES 7 UNITATS BÀSIQUES DEL SISTEMA INTERNACIONAL

Maite Pueyo i Eugeni Vilalta



SECCIÓ CATALANA DE METROLOGIA

19 de maig 2018

Vilanova i la Geltrú

LES DEFINICIONS DEL SI

El Sistema Internacional d'Unitats està compost per les següents 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



LES DEFINICIONS DEL SI

DATA A RECORDAR: 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.

Nou enfocament: 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.



SECCIÓ CATALANA DE METROLOGIA

LES DEFINICIONS DEL SI

S'estableix un valor fix per a les següents constants:

- $\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770$ hertz (Hz). És la freqüència de la transició entre els dos nivells hiperfins de l'estat fonamental, sense pertorbar, de l'àtom de cesi-133
- $c = 299\,792\,458$ metres per segon (m/s). És la velocitat de la llum al buit
- $h = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ joules segon (J·s). És la constant de Planck



LES DEFINICIONS DEL SI

- $e = 1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ coulombs (C). És la càrrega elemental.
- $k = 1,380\ 649 \times 10^{-23}$ joules kelvin (J·K). És la constant de Boltzmann
- $N_A = 6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ mols a la menys u (mol^{-1}). És el nombre d'Avogadro.
- $K_{cd} = 683$ lúmens per watt (lm/W). És l'eficàcia lluminosa de la radiació monocromàtica de freqüència 540×10^{12} Hz



LES DEFINICIONS DEL SI

Recordem que algunes de les unitats associades a aquestes constants: hertz, joule, coulomb, lumen i watt, estan relacionades amb les unitats segon, metre, kilogram, ampere, kelvin, mol i candela:

$$\text{Hz} = \text{s}^{-1}$$

$$\text{J} = \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$$

$$\text{C} = \text{A} \cdot \text{s},$$

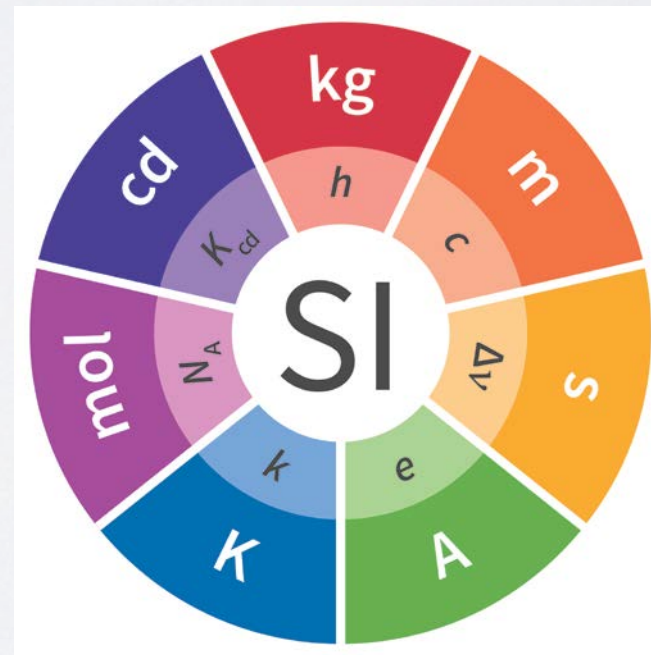
$$\text{lm} = \text{cd} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2} = \text{cd} \cdot \text{sr}$$

$$\text{W} = \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$$



LES DEFINICIONS DEL SI

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.



SECCIÓ CATALANA DE METROLOGIA

LES DEFINICIONS DEL SI

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.



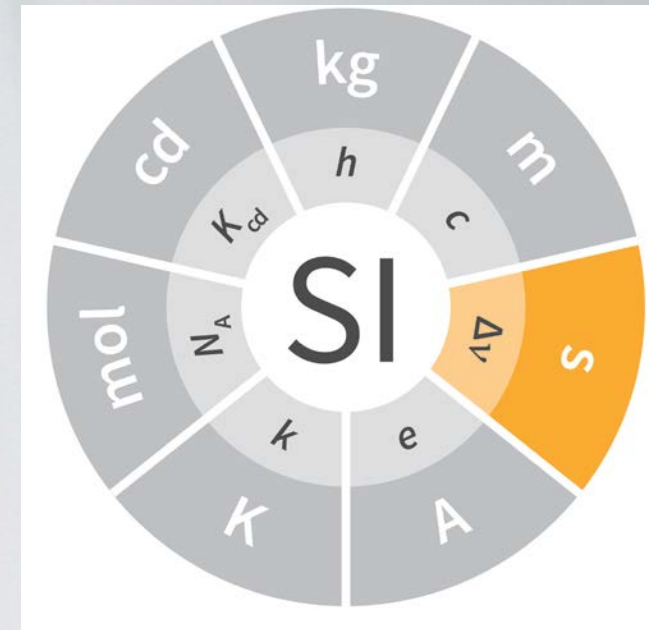
SECCIÓ CATALANA DE METROLOGIA

LES DEFINICIONS DEL SI

EL SEGON

El segon , símbol s, és la unitat SI de temps.

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 $\Delta\nu_{Cs}$ com a 9 192 631 770 quan s'expressa en la unitat Hz, que és igual a s^{-1} .



Només ha canviat la redacció de la definició.



SECCIÓ CATALANA DE METROLOGIA

LES DEFINICIONS DEL SI

EL METRE, L'AMPERE I EL KILOGRAM

Aquestes tres unitats estan relacionades amb les constants fonamentals de la natura, que són:

e , la unitat elemental de càrrega elèctrica (realitzada per la càrrega de l'electró),

h , la constant de Planck, i

c , la velocitat límit (realitzada per la velocitat de la llum al buit).

Totes 3 relacionades amb la permeabilitat magnètica del buit (μ_0) a través de la constant d'estructura fina (α), igual a $1/137,035999139(31)$.

$$\alpha = \frac{\mu_0 c e^2}{2h}$$



SECCIÓ CATALANA DE METROLOGIA

LES DEFINICIONS DEL SI

EL METRE, L'AMPERE I EL KILOGRAM

$$\alpha = \frac{\mu_0 c e^2}{2h}$$

Fins ara, c i μ_0 estan fixades (per les definicions de metre i ampere, respectivament) i e i h tenen valors que cal determinar experimentalment.

En la nova versió del SI, c , e i h estan fixades (per les definicions de metre, ampere i kilogram), i només μ_0 té un valor que cal determinar experimentalment.



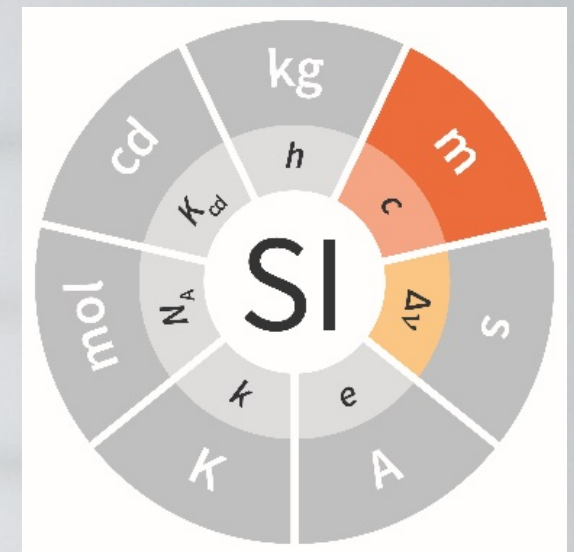
LES DEFINICIONS DEL SI

EL METRE

El metre, símbol m, és la unitat SI de longitud.

Queda definit prenent el valor numèric fix de la velocitat de la llum al buit c com a 299 792 458 quan s'expressa en la unitat m/s, on el segon està definit en termes de $\Delta \nu_{\text{Cs}}$.

Només ha canviat la redacció de la definició.

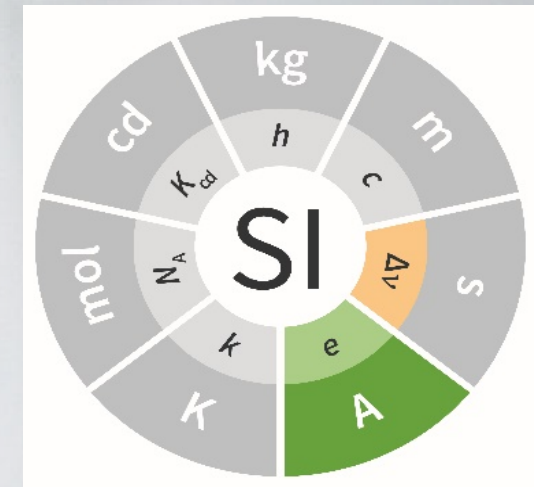


LES DEFINICIONS DEL SI

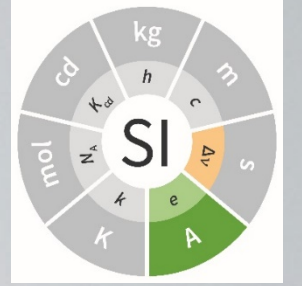
L'AMPERE

L'ampere, símbol A, és la unitat SI de corrent elèctric.

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 $A \cdot s$, on el segon està definit en termes de $\Delta \nu_{Cs}$.



LES DEFINICIONS DEL SI



L'AMPERE

La nova definició de l'ampere s'ajusta més a la forma pràctica com s'han estat realitzant les unitats elèctriques.

La definició actual de l'ampere no permetia una realització pràctica de la magnitud (no és possible tenir conductors de longitud infinita). Per aquesta raó sempre s'ha materialitzat a través del volt (relacionat amb l'efecte Josephson) i l'ohm (relacionat amb l'efecte Hall quàntic),



SECCIÓ CATALANA DE METROLOGIA

19 de maig 2018

Vilanova i la Geltrú

LES DEFINICIONS DEL SI



L'AMPERE

Com a conseqüència de la nova definició de l'ampere, ja no són necessàries les escales V_{J-90} i Ω_{K-90} i els valors de les constants de Josephson (K_J) i de von Klitzing (R_K) es determinen a partir de les definicions teòriques i els valors de h i e . A partir de les relacions següents:

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

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



LES DEFINICIONS DEL SI



L'AMPERE

Els nous valors de les constants de Josephson (K_J) i de von Klitzing (R_K) són:

R_{K-90}	R_K
25 812,807 Ω	25 812,807 46 Ω

K_{J-90}	K_J
483 597,9 GHz V^{-1}	483 597,848 4 GHz V^{-1}

Aquesta redefinició suposarà canvis molt petits a totes les unitats elèctriques.

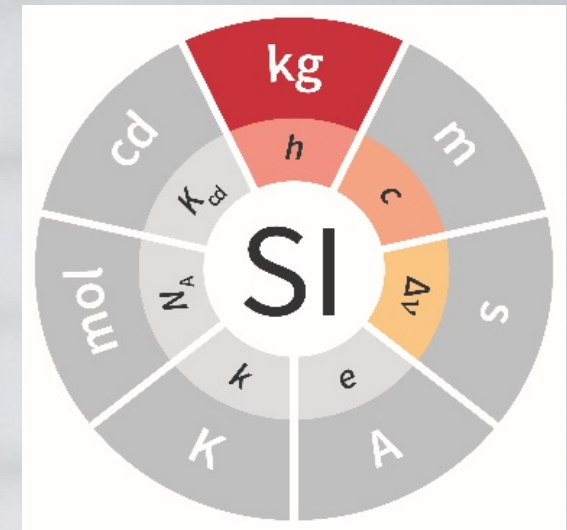


LES DEFINICIONS DEL SI

EL KILOGRAM

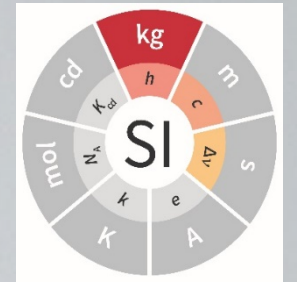
El kilogram, símbol kg, és la unitat SI de massa.

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 J·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 $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.



LES DEFINICTIONS DEL SI

EL KILOGRAM : Relació entre el kilogram i la constant de Planck:

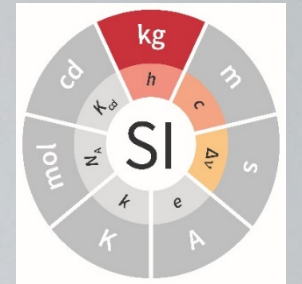


<https://vimeo.com/128598681>

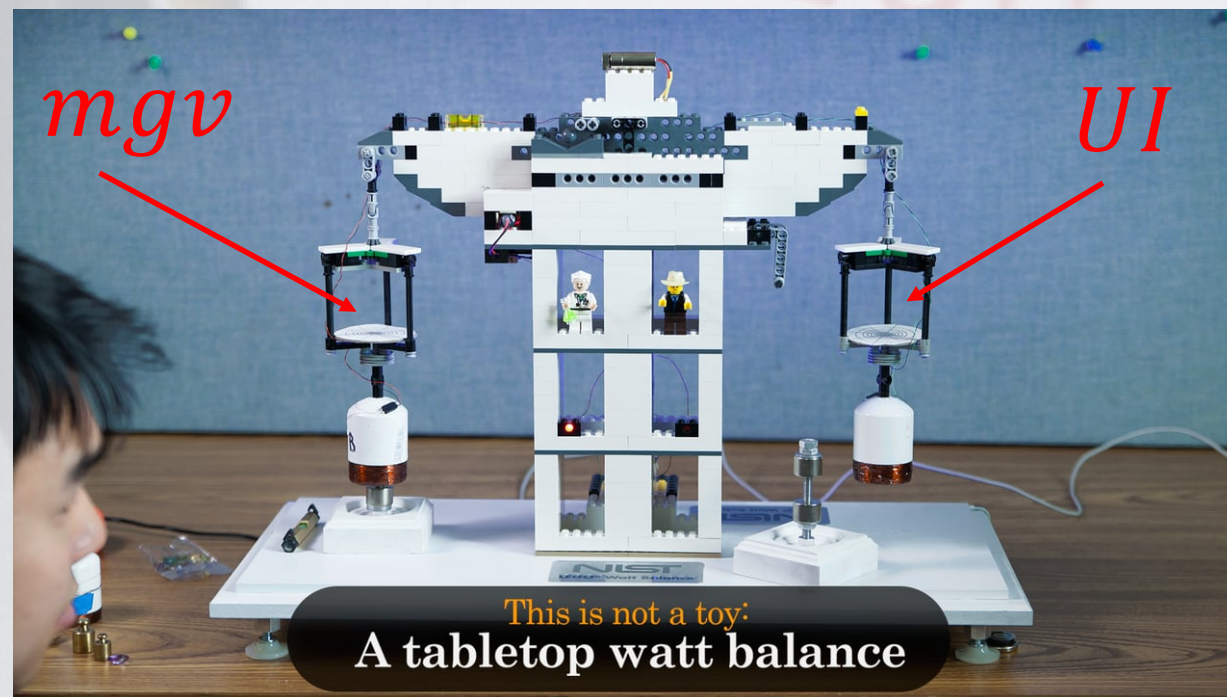


SECCIÓ CATALANA DE METROLOGIA

LES DEFINICTIONS DEL SI



EL KILOGRAM : la balança de Kibble:



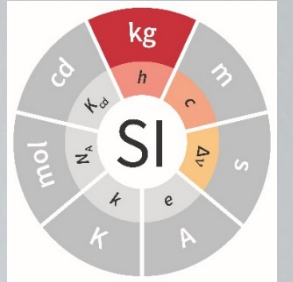
$$\begin{aligned} mgv &= UI \\ &= n f_J \frac{1}{K_J} \frac{n' f'_J}{K_J r R_K} \\ &= \frac{nn'}{r} f_J f'_J \frac{1}{K_J^2 R_K} \end{aligned}$$

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



SECCIÓ CATALANA DE METROLOGIA

LES DEFINICTIONS DEL SI



EL KILOGRAM : relació amb h

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

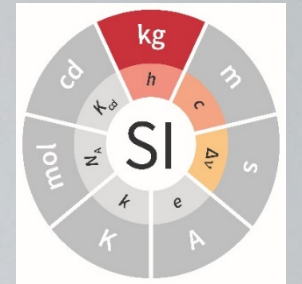
Coneixent que les constants K_J i R_K están en funció de h i e , s'arriba a que:

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



SECCIÓ CATALANA DE METROLOGIA

LES DEFINICIONS DEL SI



EL KILOGRAM :

La definició del kg en termes de la constant de Planck garanteix una estabilitat a llarg termini de l'escala de massa.

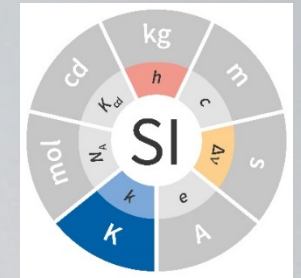
La massa del Kilogram Prototip Internacional, $m(K)$, en el moment del canvi de definició, és 1 kg, amb una incertesa estàndard relativa de $1,0 \times 10^{-8}$.



SECCIÓ CATALANA DE METROLOGIA

LES DEFINICIONS DEL SI

EL KELVIN

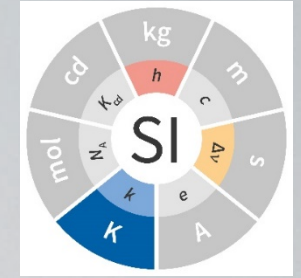


La unitat de temperatura termodinàmica, el kelvin, està vinculada a la constant de Boltzmann (k), la qual serveix per relacionar les definicions microscòpica i macroscòpica de l'entropia (S).



SECCIÓ CATALANA DE METROLOGIA

LES DEFINICIONS DEL SI



EL KELVIN

A nivell microscòpic, sabem que:

un nombre (W) d'estats microscòpics diferents, que corresponen al mateix estat macroscòpic, estableixen el valor de l'entropia (S) a partir de l'equació:

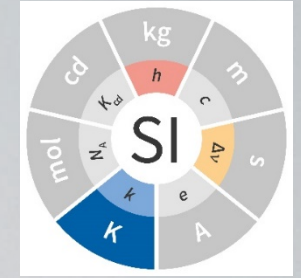
$$S = k \ln W$$

Essent k la constant de Boltzmann.



SECCIÓ CATALANA DE METROLOGIA

LES DEFINICIONS DEL SI



EL KELVIN

A nivell macroscòpic, el canvi d'entropia (ΔS) està relacionat amb la transferència de calor quan dividim a aquesta per la temperatura termodinàmica (T). Segons l'equació:

$$\Delta S = \int \frac{\delta Q}{T}$$

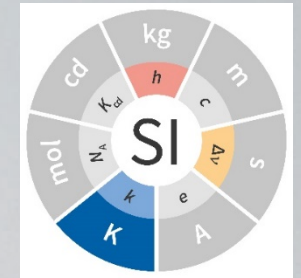
Si unim les dues equacions, tenim: $\Delta(\ln W) = \int \frac{\delta Q}{kT}$



LES DEFINICIONS DEL SI

EL KELVIN

$$\Delta(\ln W) = \int \frac{\delta Q}{kT}$$



$(\ln W)$ no té dimensions, per tant, el producte kT ha de tenir dimensions d'energia.

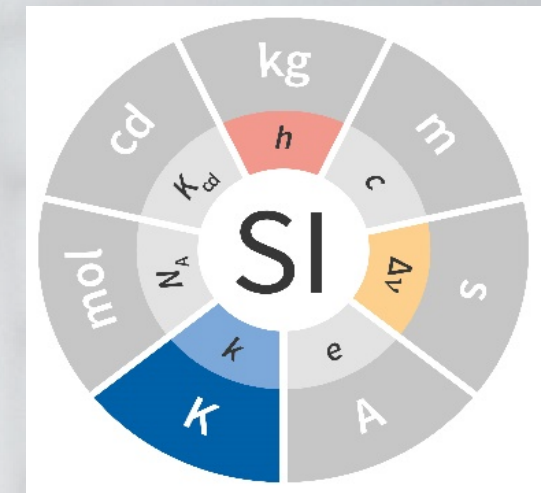
Com que la unitat d'energia ja ha quedat fixada per la constant de Planck i la definició de segon ($J \cdot s/s$), al fixar el valor de la constant de Boltzmann k també fixem la unitat de temperatura termodinàmica.



LES DEFINICIONS DEL SI

EL KELVIN

El kelvin, símbol K, és la unitat SI de temperatura termodinàmica.



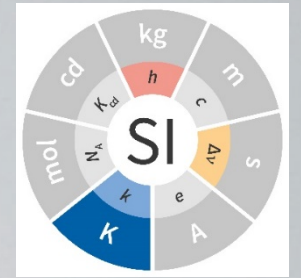
Queda definit prenent el valor numèric fix de la constant de Boltzmann k com a $1,380\ 649 \times 10^{-23}$ quan s'expressa en la unitat J·K, que és igual a $\text{kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, on el kilogram, metre i segon estan definits en termes de h , c i $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.



SECCIÓ CATALANA DE METROLOGIA

LES DEFINICIONS DEL SI

EL KELVIN



La nova definició del Kelvin no té efecte immediat sobre la seva mesura pràctica ni sobre la traçabilitat de les mesures de temperatura. Per tant, es manté l'Escala Internacional de Temperatura EIT-90

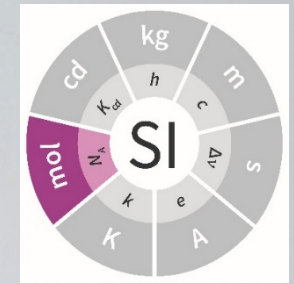
Aquesta redefinició posa les bases per a millores futures. Una definició que no depèn de cap material ni posa restriccions tecnològiques permetrà el desenvolupament de tècniques noves i més exactes.



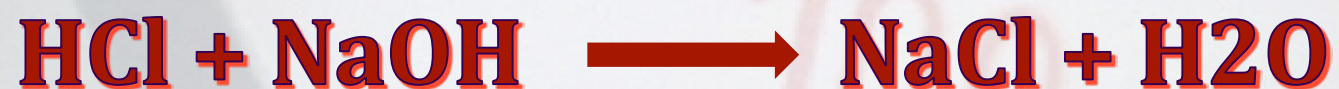
SECCIÓ CATALANA DE METROLOGIA

LES DEFINICIONS DEL SI

EL MOL



En una reacció química hi intervenen nombres enters de mol·lècules o d'àtoms. Per exemple, podem dir que una molècula de HCl reacciona amb una molècula de NaOH per a obtenir una molècula de NaCl i una de H₂O.



A nivell pràctic, en un laboratori les substàncies no es manipulen comptant el nombre de molècules sinó mesurant la massa de la substància.



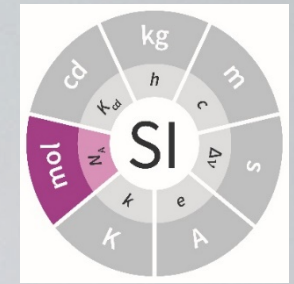
SECCIÓ CATALANA DE METROLOGIA

19 de maig 2018

Vilanova i la Geltrú

LES DEFINICIONS DEL SI

EL MOL



La quantitat de substància es defineix com a proporcional al nombre d'entitats elementals especificades en una mostra, amb una constant de proporcionalitat universal, igual per a totes les mostres. La intenció de la introducció d'aquesta magnitud és que:

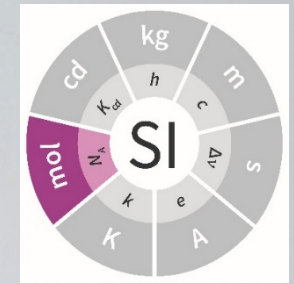
- sigui proporcional al nombre d'entitats elementals
- sigui macroscòpica
- es pugui relacionar amb les determinacions de massa, volum, concentració, molaritat,...



SECCIÓ CATALANA DE METROLOGIA

LES DEFINICIONS DEL SI

EL MOL



L'equació que defineix la quantitat de substància és:

$$n(X) = N(X)/N_A$$

on $n(X)$ és la quantitat de substància de les entitats X en una mostra específica, $N(X)$ és el nombre d'entitats X en la mostra considerada i N_A és la constant de proporcionalitat, la constant d'Avogadro.



SECCIÓ CATALANA DE METROLOGIA

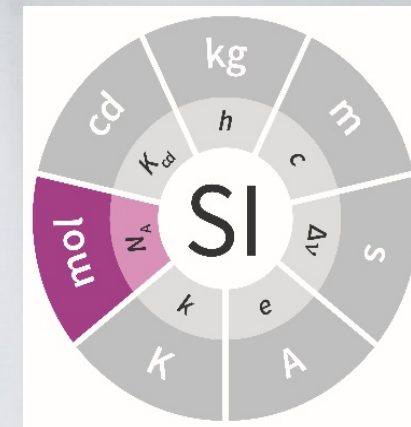
LES DEFINICIONS DEL SI

EL MOL

El mol, símbol mol, és la unitat SI de quantitat de substància.

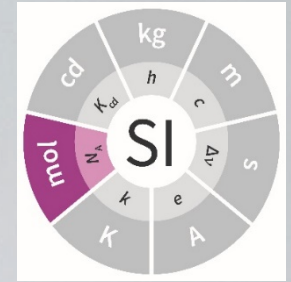
Queda definit prenent el valor numèric fix de la constant d'Avogadro N_A com a $6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ quan s'expressa en la unitat mol^{-1} .

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



LES DEFINICIONS DEL SI

EL MOL



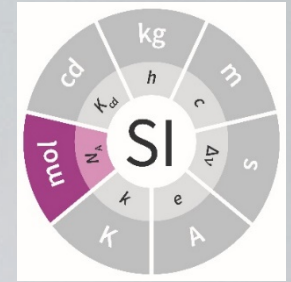
Relacionat amb el mol està el concepte de massa molar d'una entitat X, $M(X)$, que és la massa d'un mol de l'entitat X. De forma que la massa m d'una mostra ve donada per:

$$m = M(X) \cdot n(X)$$



LES DEFINICIONS DEL SI

EL MOL



A nivell pràctic, la traçabilitat del mol seguirà establint-se a través de les mesures de massa i els valors dels pesos atòmics o les masses molars (que no canvien).

Per exemple, la massa molar del carboni 12, $M(^{12}\text{C})$, en el moment del canvi de definició és $0,012 \text{ kg mol}^{-1}$ amb una incertesa estàndard relativa de $4,5 \times 10^{-10}$.

Amb el canvi de definició, el seu valor depèn de h i N_A .

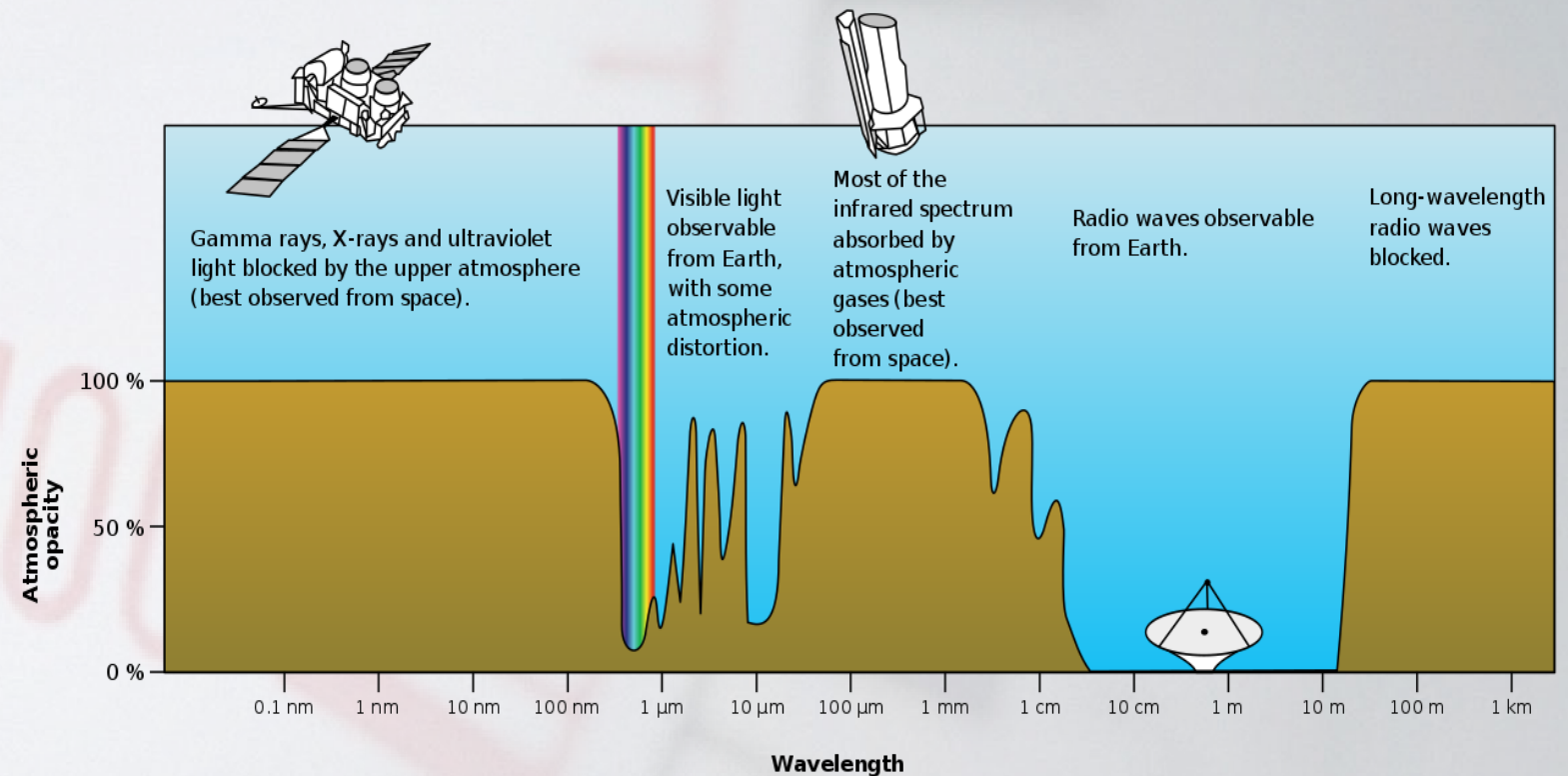
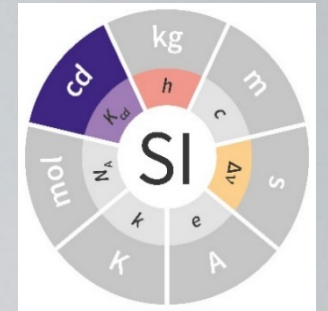


LES DEFINICTIONS DEL SI

LA CANDELA

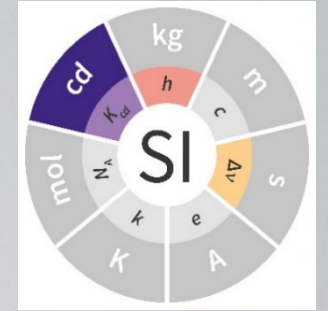
La intensitat radiant de la radiació lluminosa emesa per una font és una propietat intrínseca d'aquesta radiació, independent de la seva freqüència.

A la superfície de la Terra, però, l'atmosfera protectora només permet passar unes certes freqüències de la radiació emesa pel Sol.

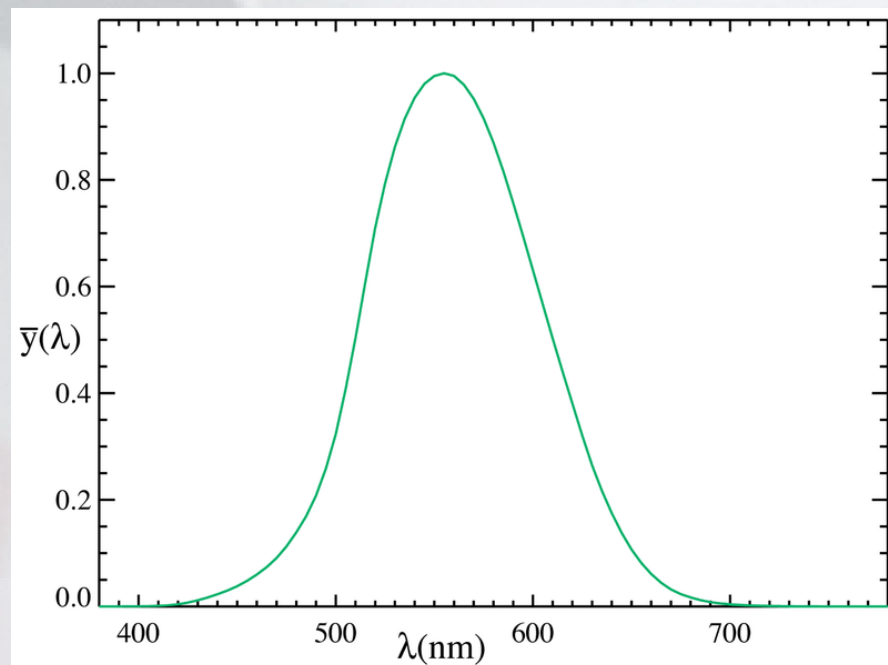


LES DEFINICIONS DEL SI

LA CANDELA



L'ull humà s'ha adaptat a aquesta radiació filtrada per l'atmosfera, de forma que la visió humana té una eficàcia diferent en funció de la longitud d'ona.

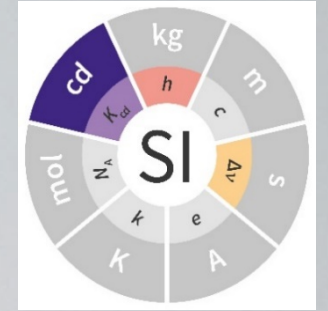


En el cas de bona il·luminació (visió fotòpica), la funció internacionalment consensuada a la CIE (Comission Internationale de l'Éclairage, Comissió Internacional de la Il·luminació) és corresponent a la finestra atmosfèrica.



SECCIÓ CATALANA DE METROLOGIA

LES DEFINICTIONS DEL SI



LA CANDELA

La intensitat lluminosa (I_v) d'una font monocromàtica està relacionada amb la intensitat radiant (I_e) mitjançant l'expressió següent:

$$I_v = \frac{K_{cd}}{V(555,016 \text{ nm})} V(\lambda_a) I_e(\lambda_a)$$

Essent: K_{cd} l'eficàcia lluminosa,

$V(\lambda_a)$ la funció de luminositat fotòpica

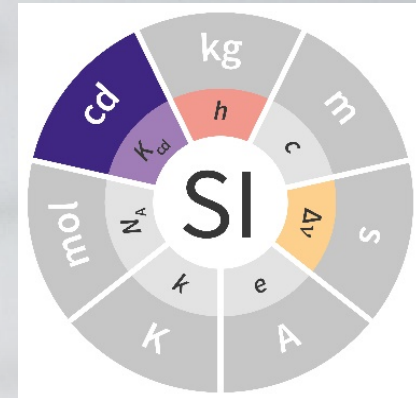
$V(555,016 \text{ nm}) = 0,999 997$. La longitud d'ona de 555,016 nm és la corresponent a l'aire normalitzat a la freqüència de 540 THz.



SECCIÓ CATALANA DE METROLOGIA

LES DEFINICIONS DEL SI

LA CANDELA



La candela, símbol cd, és la unitat SI d'intensitat lluminosa en una determinada direcció. Queda definida prenent el valor numèric fix de l'eficàcia lluminosa de la radiació monocromàtica de freqüència 540×10^{12} Hz, K_{cd} , com a 683 quan s'expressa en la unitat $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$, que és igual a $\text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^3$, on el kilogram, metre i segon estan definits en termes de h , c i $\Delta\nu_{Cs}$.

Només ha canviat la redacció de la definició.



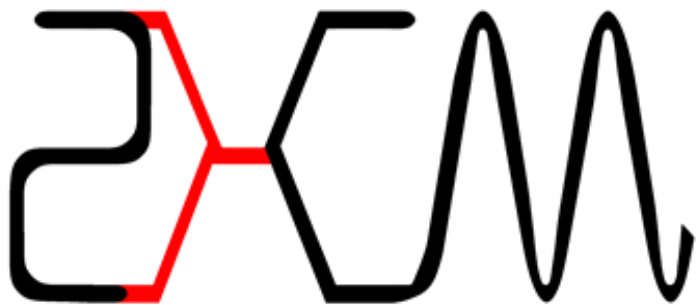
SECCIÓ CATALANA DE METROLOGIA

19 de maig 2018

Vilanova i la Geltrú

AGRAÏMENTS

- A tots vosaltres per la vostra atenció
- Als companys/es de la Secció Catalana de Metrologia
- Als companys/es de la escola universitària de la UPC a Vilanova i la Geltrú (EPSEVG)



SECCIÓ CATALANA DE METROLOGIA

19 de maig 2018

Vilanova i la Geltrú