



Hacia la redefinición del kg por medios electromagnéticos

Dr. David Avilés

Temario:



- **El kilogramo actual**
- **Hacia una nueva definición**
 - La balanza del watt
- **Los patrones eléctricos cuánticos**
 - El efecto Josephson
 - El efecto Hall cuantizado
 - El tuneleo individual de electrones
- **Cambios en las unidades eléctricas**
- **Completando el cambio. “Hacia la redefinición del ampere”**
- **Conclusiones**

El kilogramo actual

Definición actual (3ª CGPM – 1901):

El kilogramo es la unidad de masa; él es igual a la masa del prototipo internacional del kilogramo



Inconvenientes de mantener la definición actual del kg

- Deriva confirmada promedio de 0,25 $\mu\text{g/año}$
- Varias unidades básicas (A, mol, cd) y otras de alta exactitud (V, Ω , ...) dependen del valor del kg.
- Único patrón internacional que queda basado en un artefacto
 - Posible daño o pérdida
 - Patrón existente en un solo lugar

Hacia una nueva definición

Proyectos orientados a la redefinición del kg

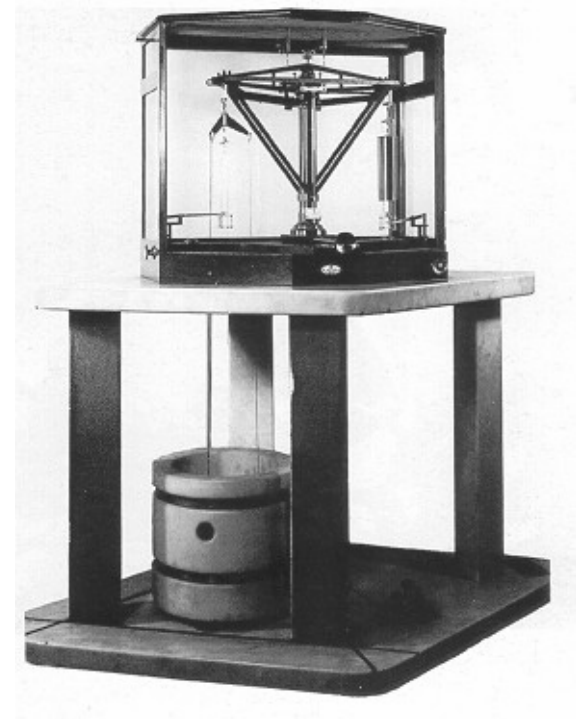
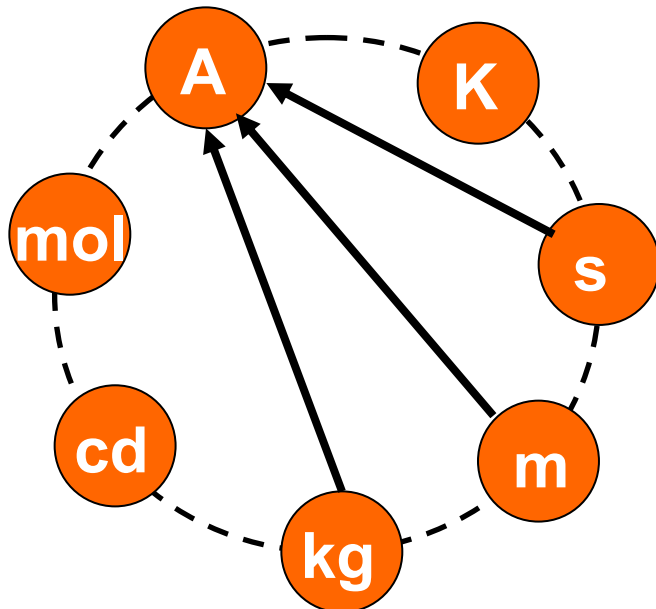
- **La balanza del Watt**
 - NIST U < $0,06 \times 10^{-6}$ @ 1 kg
 - NPL U $\approx 0,07 \times 10^{-6}$ @ kg
 - METAS reconstrucción
 - BIPM y BNM en construcción
- **El proyecto de Avogadro U $\approx 0,2 \times 10^{-6}$ (1 kg)**
- **Conteo de iones U $\approx 1,5$ %, (10 g en 6 días)**
- **Levitación Magnética, sin financiamiento**

1946

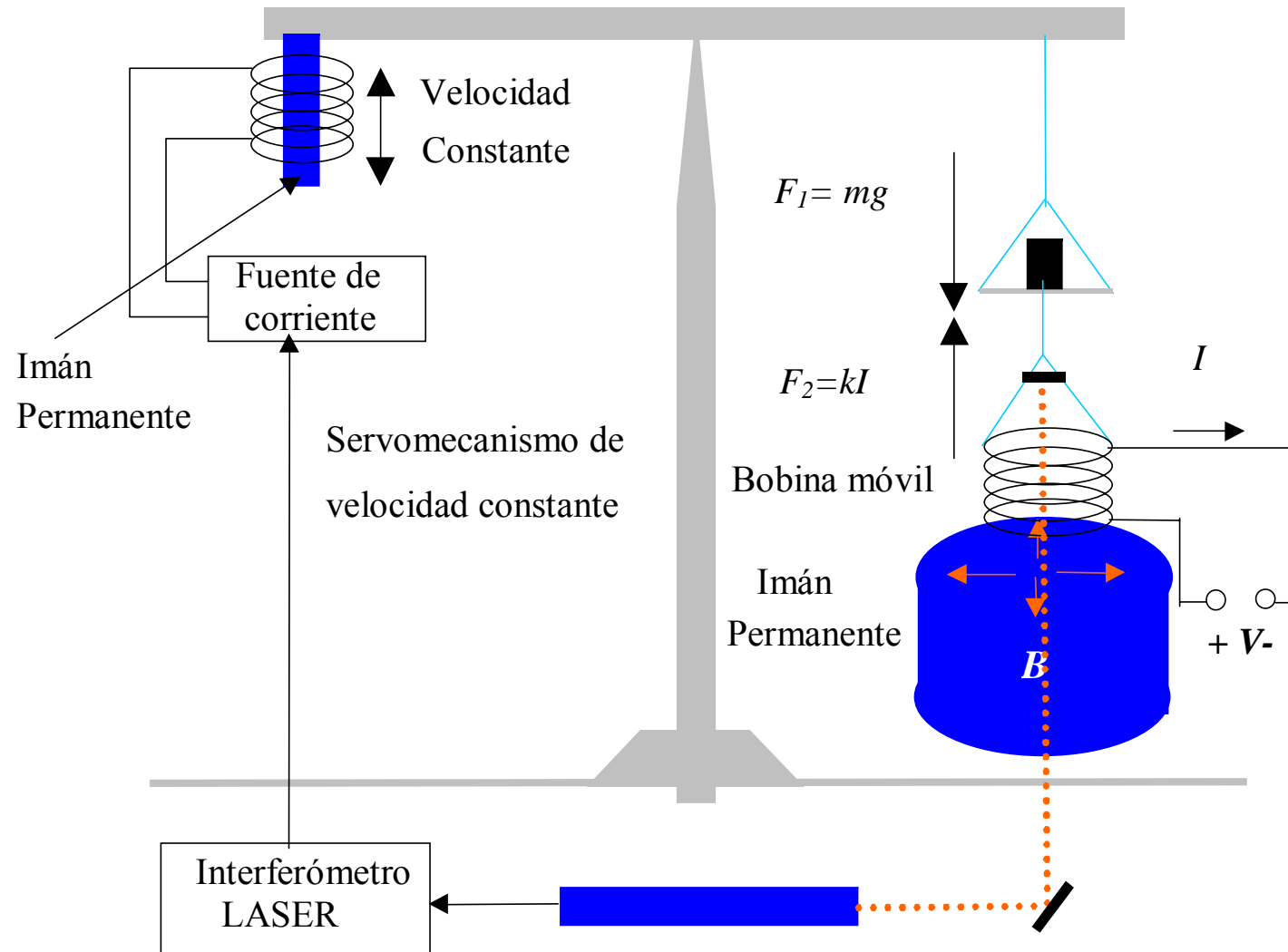
La balanza del ampere, antecedente de la balanza del watt

Definición (9° CGPM, 1946):

El ampere es la corriente constante que si es mantenida en dos conductores rectos paralelos de longitud infinita de sección circular despreciable, y colocados a una distancia de un metro en el vacío, producirán entre ellos una fuerza de 2×10^{-7} N por metro de longitud. (se fija $\mu_0 = 4 \times 10^{-7}$ H/m)



Principio de la balanza del watt



En la etapa estática se equilibra $F_1 = F_2$, por lo tanto:

$$mg = kI$$

En la etapa dinámica se determina k

$$k = V / v$$

Sustituyendo k en la ecuación anterior se llega a que:

$$mg = (V/v) I$$

Reagrupando:

$$mgv = VI$$

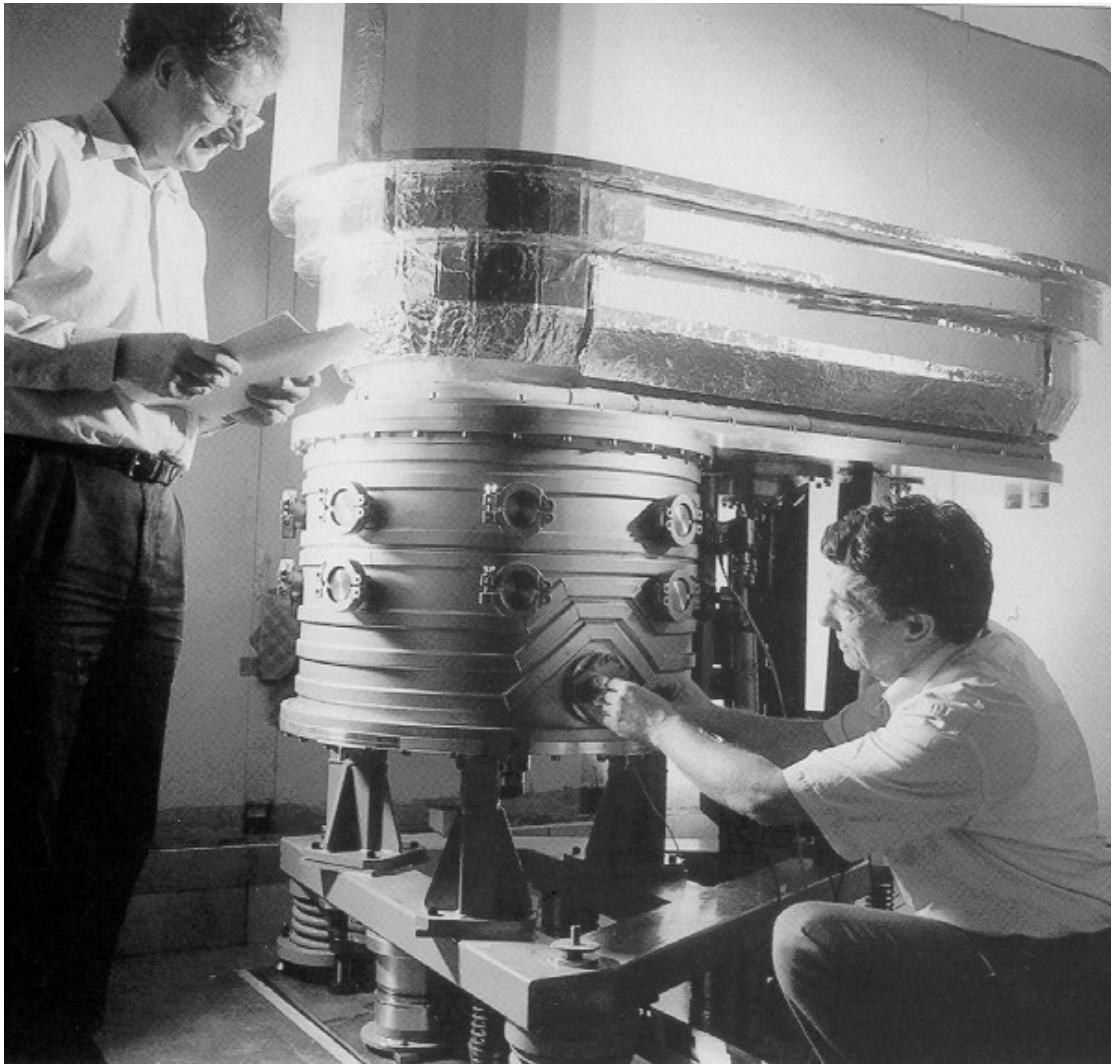
Potencia mecánica (mgv) = Potencia eléctrica (VI)

$$R_H = \frac{h}{ie^2} \quad V_j = n f_j \frac{h}{2e}$$

Sustituyendo V por V_j e I por V_j / R_H y reagrupando:

$$m = A \frac{f_j^2}{gv} h \quad \text{donde } A \text{ se determina experimentalmente.}$$





Fotografía de la Balanza del watt del NPL. Ian Robinson a la izquierda y Brian Kibble a la derecha.

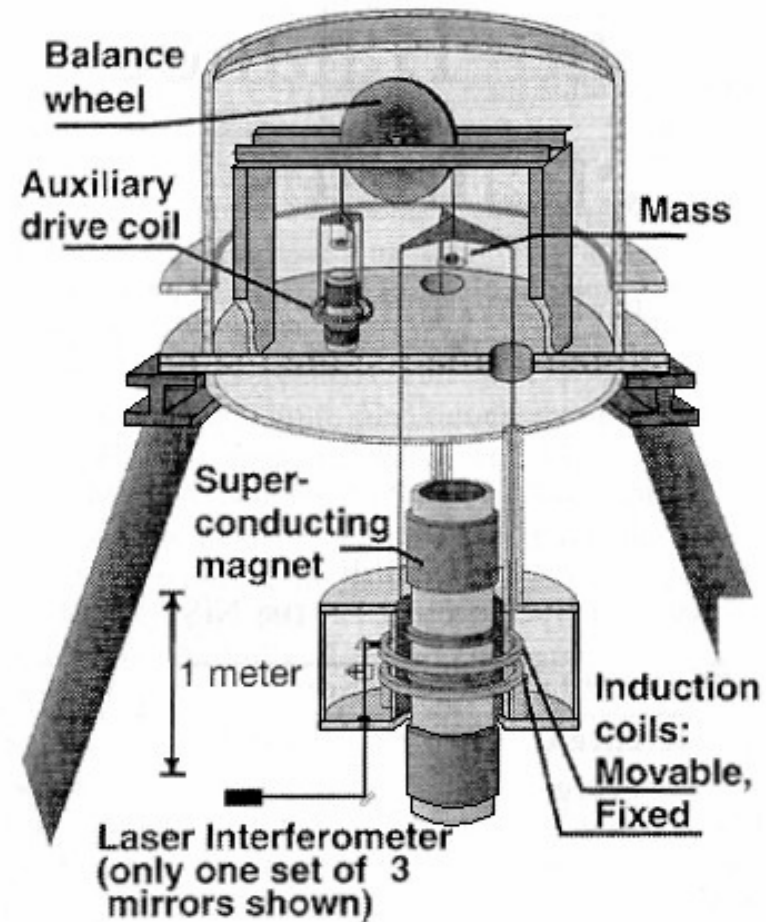


Diagrama de la balanza del watt del NIST



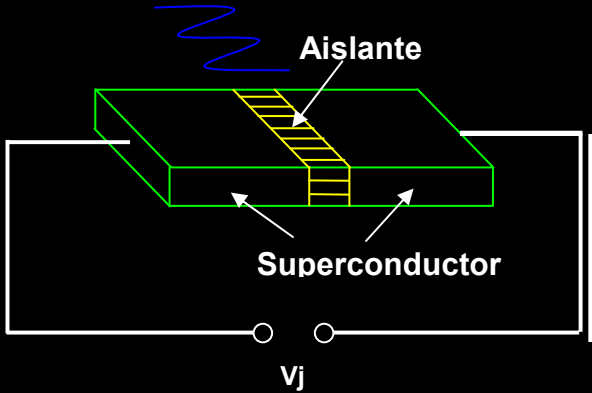
Fotografía de la balanza del watt de METAS

Los patrones eléctricos cuánticos

1962 – 1984

El volt – realización cuántica - efecto Josephson


Microonda de Frecuencia f



Aislante

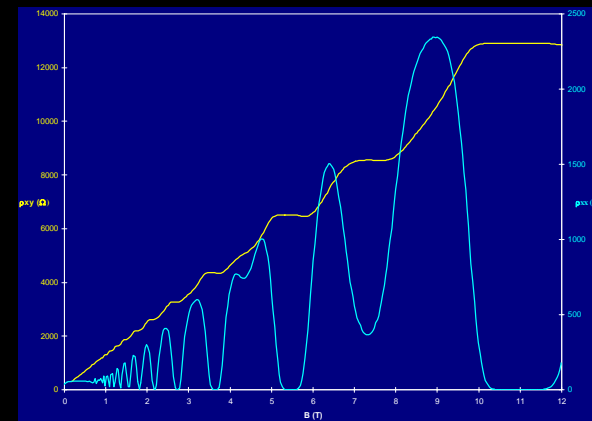
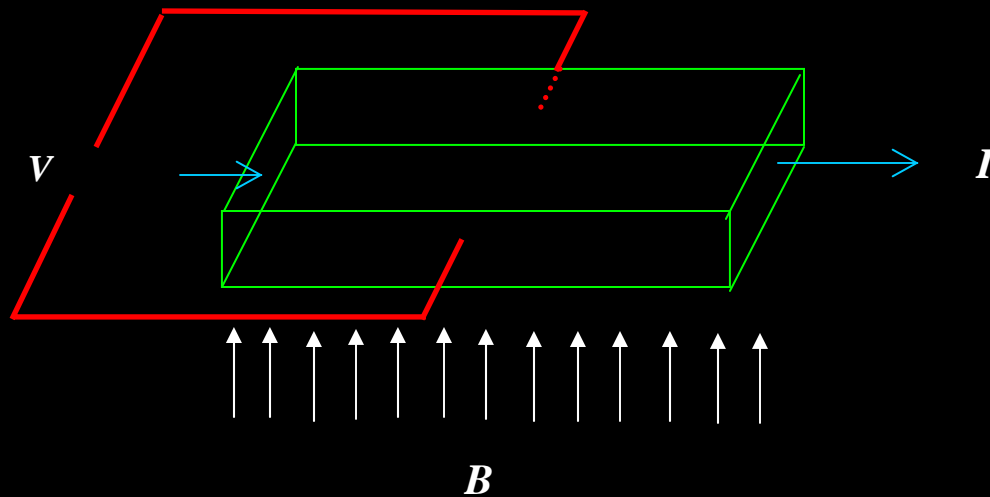
Superconductor

V_j

$$V_j = (h/2e) f n = f n / K_j$$
$$K_j = 2e/h$$


1980 - 1985

El ohm – Realización cuántica - Efecto Hall Cuantizado



$$R_H = h/ie^2 = R_K / i$$

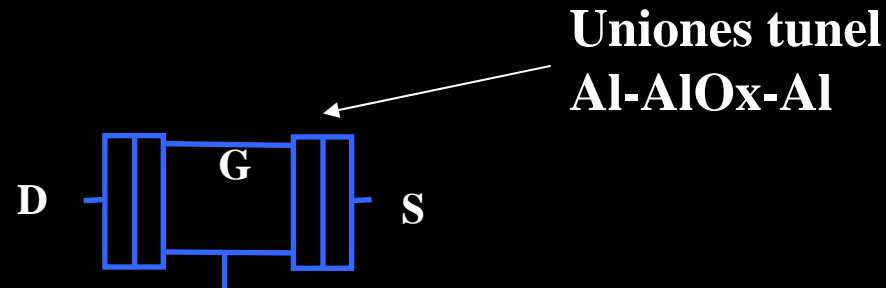
$$R_k = h/e^2$$



1980 - 1990

El Ampere – Realización cuántica – Tuneleo individual de electrones

Transistor SET



Idea Básica:

$$Q = C V \quad ; \quad e = C \Delta V \quad ; \quad \Delta V = e/C$$

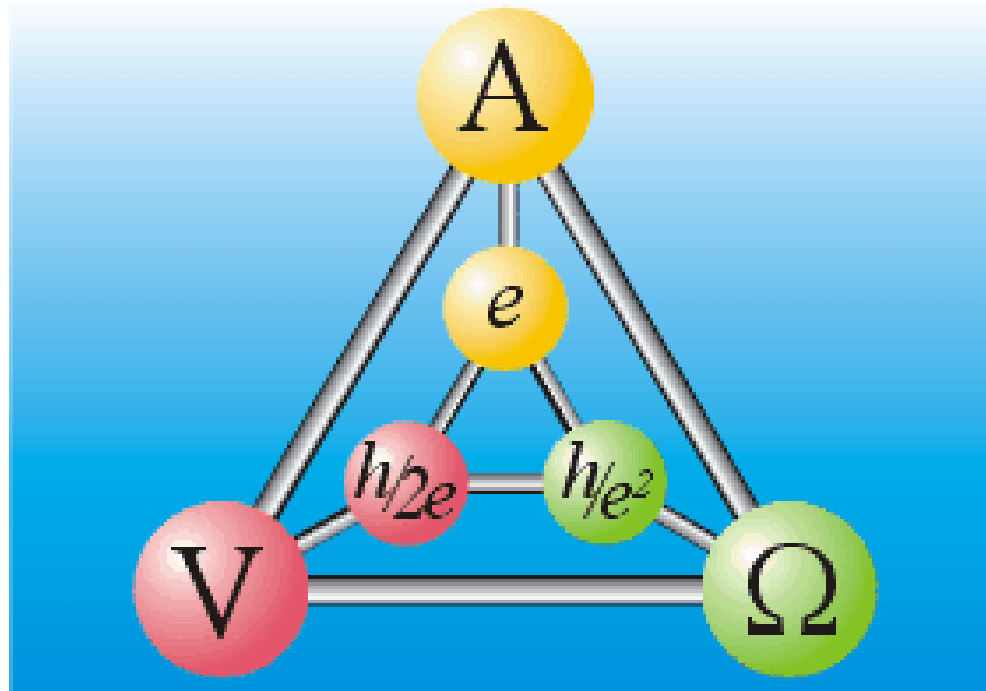
Si $C = 0,12 \text{ fF}$,

$$\Delta V = 1,6 \times 10^{-19} / 0,12 \times 10^{-15}$$
$$\Delta V = 1,33 \text{ mV}$$

$$I = f e$$

Para tener capacitores de estos niveles se requiere de estructuras nanométricas, se requieren uniones tunel del orden de 200 nm x 200 nm. La técnica utilizada para esto es Electron Beam Lithography.

Las unidades eléctricas básicas basadas en constantes fundamentales



Cambios en las unidades eléctricas

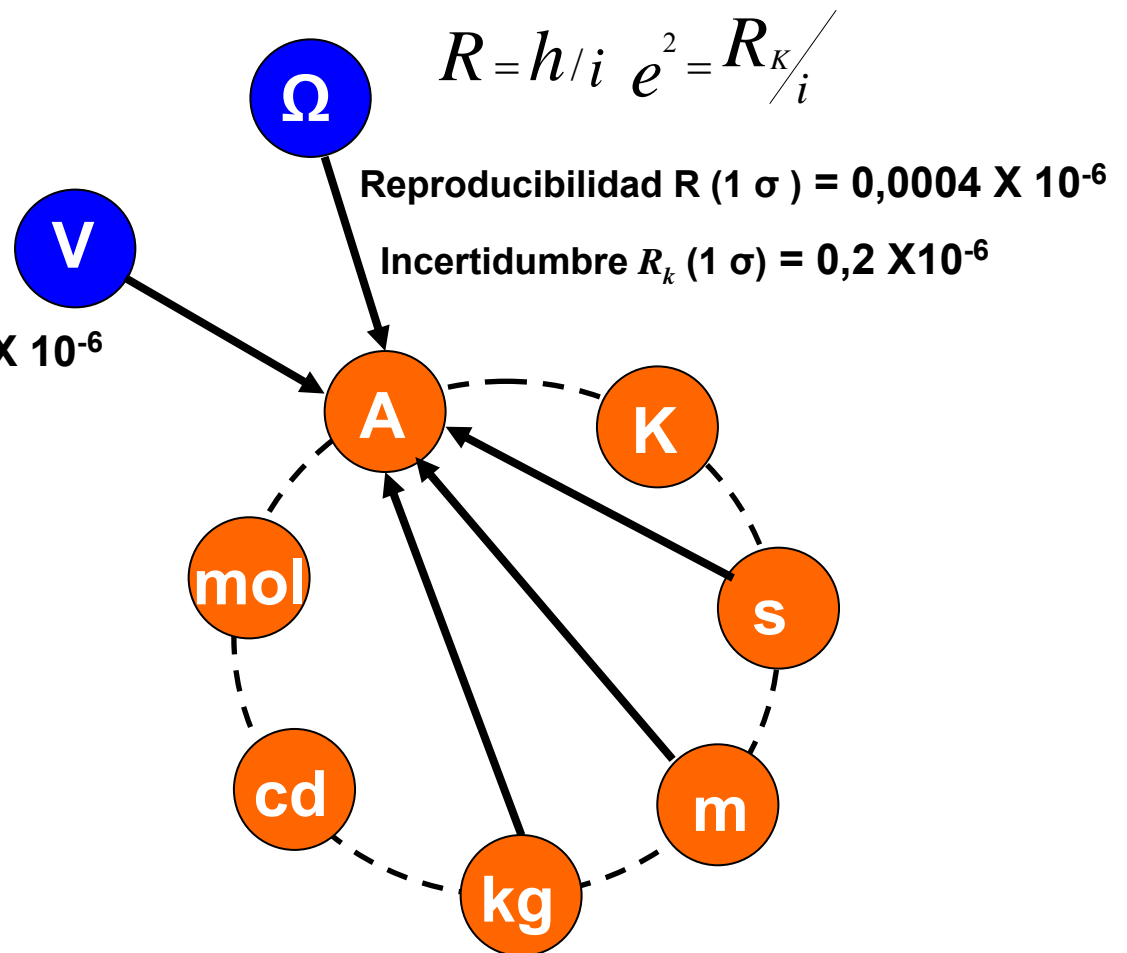
1990

Problema: La reproducibilidad es mucho mayor que la incertidumbre de K_j y R_k y sus valores e incertidumbres cambian frecuentemente.

$$V = n(2e/h)f = \frac{nf}{K_j}$$

Reproducibilidad V (1 σ) = 0,002 X 10⁻⁶

Incertidumbre K_j (1 σ) = 0,4 X 10⁻⁶



1990

Acuerdo internacional para el uso de los efectos cuánticos como referencias internacionales de tensión y resistencia eléctrica y en adelante todos usarán el mismo valor para K_{j-90} y R_{k-90}

El volt

$$K_{j-90} = 2e/h = 483\,597,9 \text{ GHz/V} \pm 0,4 \times 10^{-6}$$

$$\text{Reproducibilidad} = 0,0004 \times 10^{-6}$$

$$V_j = (h/2e) f n = f n / K_{j-90}$$

El ohm

$$R_{k-90} = h/e^2 i = 25\,812,807 \pm 0,2 \times 10^{-6}$$

$$\text{Reproducibilidad} = 0,002 \times 10^{-6}$$

$$R_H = h/e^2 i = R_{K-90} / i$$

2005

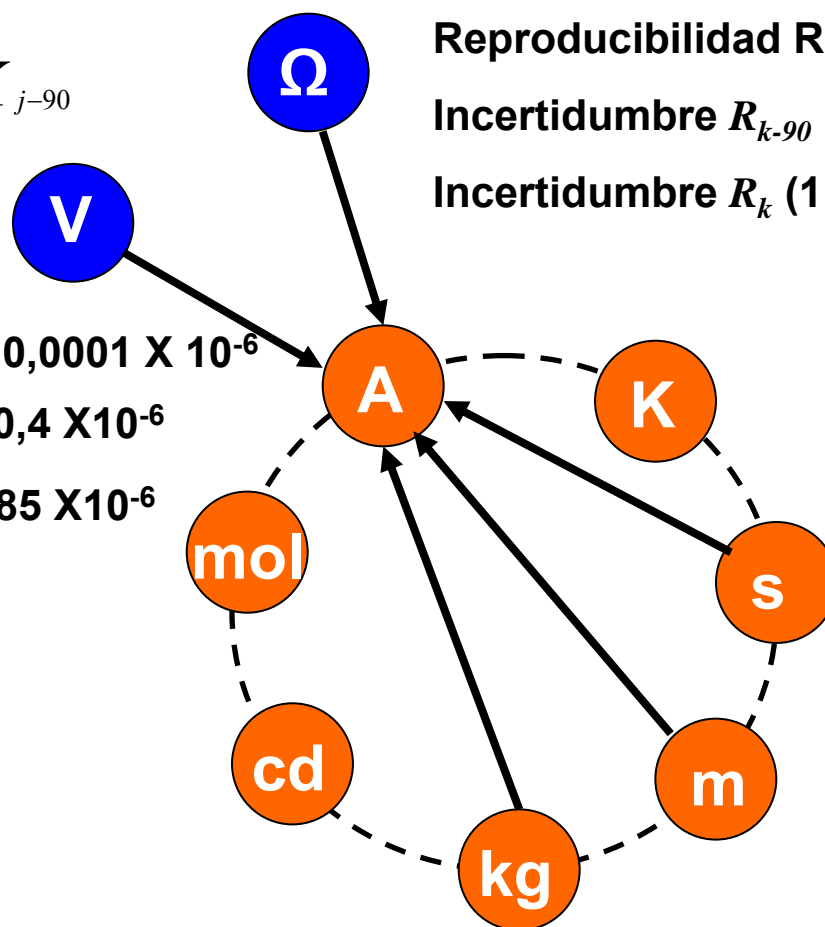
Actualmente:

$$R = h/i e^2 = R_{K-90} / i$$

$$V = n(2e/h)f = nf / K_{j-90}$$

Reproducibilidad R (1 σ) = 0,0001 X 10⁻⁶
Incertidumbre R_{k-90} (1 σ) = 0,2 X10⁻⁶
Incertidumbre R_k (1 σ) = 0,0033 X10⁻⁶

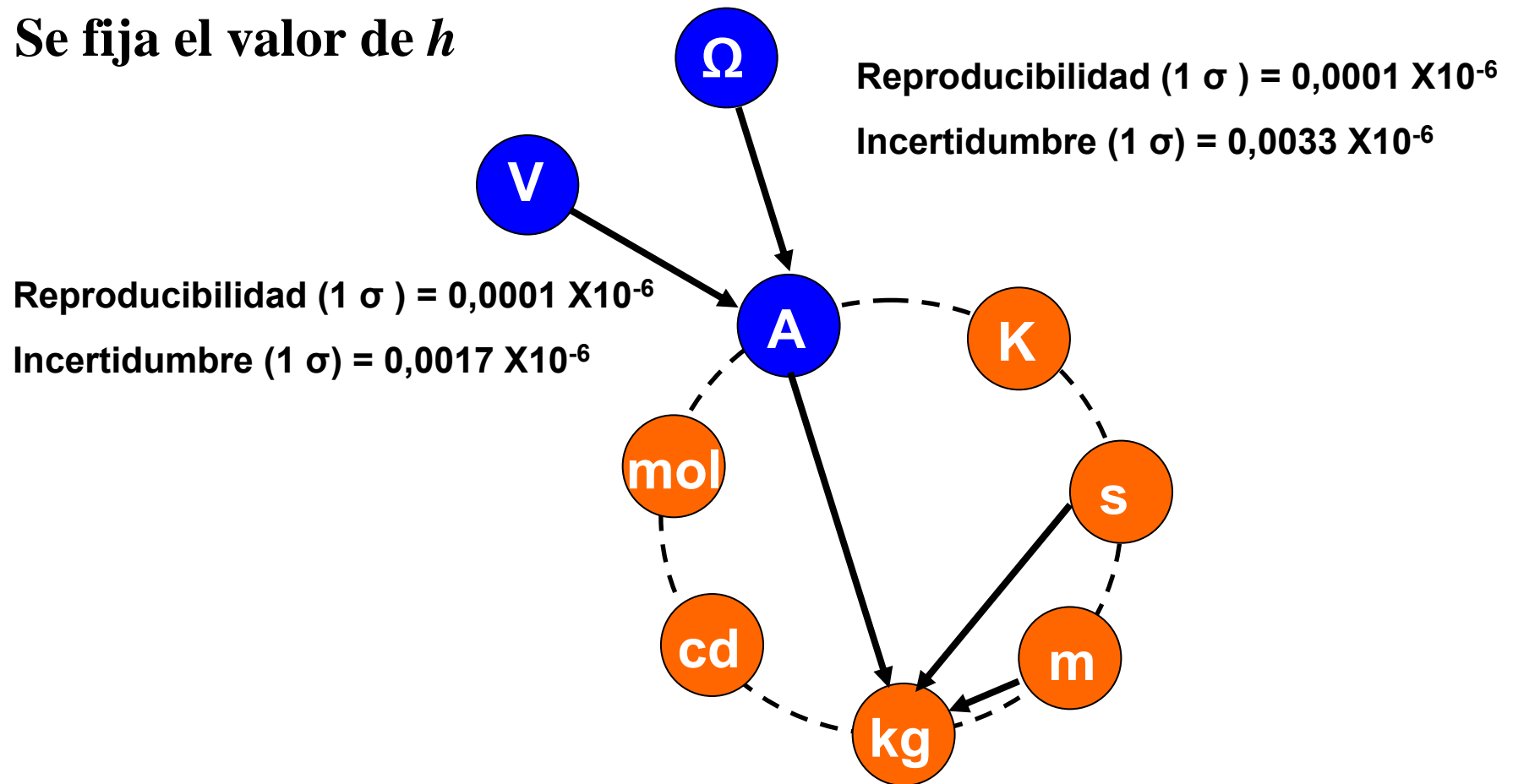
Reproducibilidad V (1 σ) = 0,0001 X 10⁻⁶
Incertidumbre K_{j-90} (1 σ) = 0,4 X10⁻⁶
Incertidumbre K_j (1 σ) = 0,085 X10⁻⁶



2007 ?

Cambio en las unidades eléctricas básicas de redefinirse el kg a partir de la balanza del watt

Se fija el valor de h



Otras ventajas de redefinirse el kg fijando la constante de Planck

- Disminución de la incertidumbre de algunas constantes fundamentales:

Constante	Incertidumbre relativa actual (X10 ⁸)	Incertidumbre relativa fijando h (X10 ⁸)
$m(k)$	0	17
h	17	0
N_A	17	0,67
e	8.5	0.17
K_j	8.5	0.17

Completando el cambio

La redefinición del ampere

$$I = f e$$

Se fijaría la carga del electrón e .

Ventajas:

- El valor de las siguientes constantes fundamentales tendría cero incertidumbre: h , e , K_j , R_k
- La incertidumbre de V , I , R y magnitudes derivadas se reduciría considerablemente

Consecuencia: El valor de μ_0 se tendría que determinar experimentalmente

Estado Actual: Con el tuneleo individual de electrones actualmente es solo posible generar corrientes del orden de pA.

Conclusiones:

- Cambios importantes en el SI.
- El cambio es hacia:
 - Magnitudes de base realizadas con fenómenos cuánticos (m, s, A, kg, mol, cd, K)
 - Fijar el valor de constantes fundamentales (invariantes de la naturaleza) y no de artefactos.
 - Magnitudes relacionadas con constantes físicas fundamentales
- Los laboratorios nacionales deberán prepararse para el cambio:
 - Metrologos con otras especialidades
 - Otro tipo de equipos e instalaciones
- Repercusiones importantes en la ciencia, la técnica y la industria