

Implicaciones del cambio en la definición del kilogramo para los usuarios

M. en C. y T. LUIS MANUEL PEÑA PÉREZ

Coordinador Científico

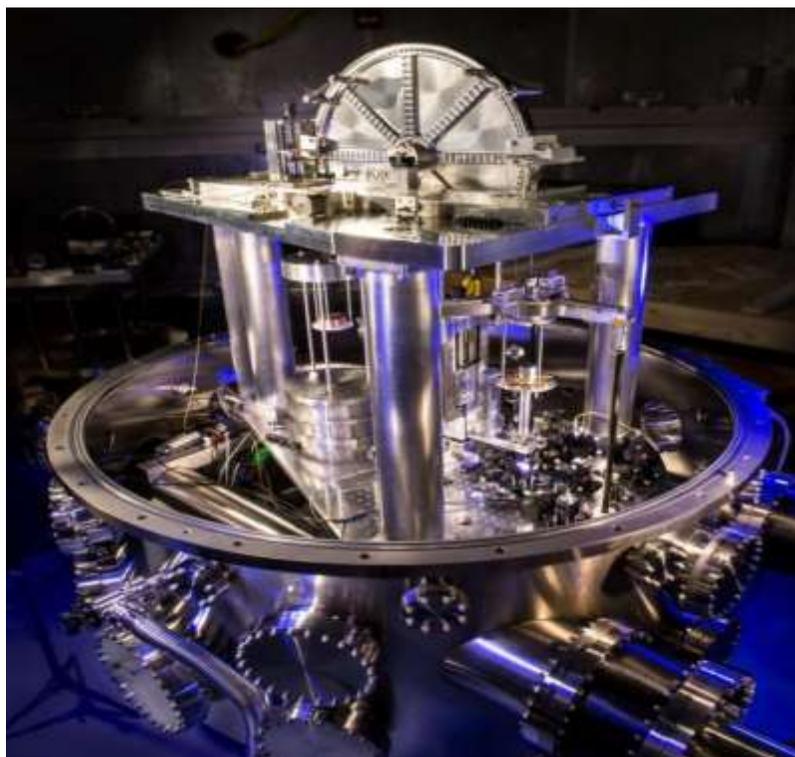
Dirección De Masa y Densidad

CENAM



Métodos primarios para realizar el kilogramo en la actualidad

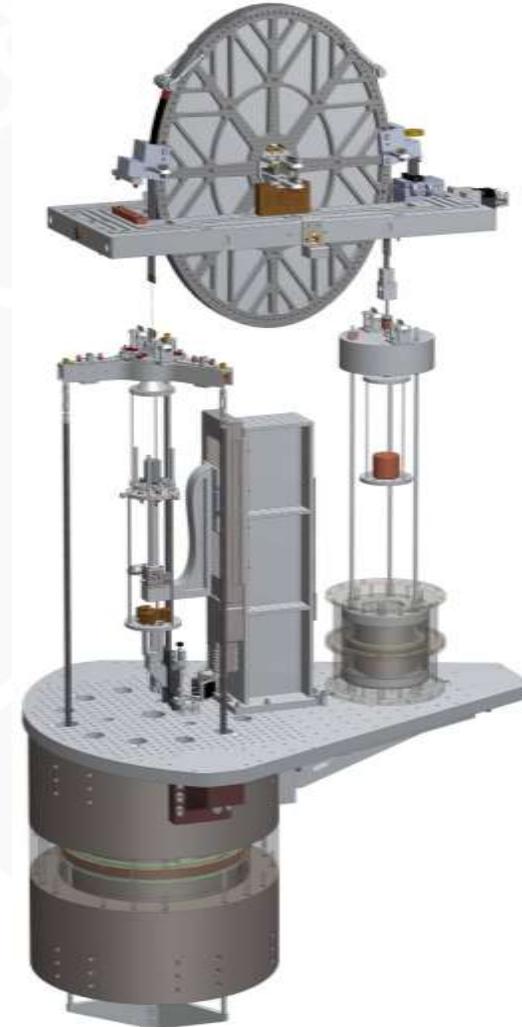
Balanza de Kibble



Método XRCD



Método de la Balanza de Kibble (ant. Balanza de watt)



In memory of Dr Bryan Kibble, 1938-2016

It is with great sadness that we announce that Dr Bryan Peter Kibble passed away on Thursday 28 April 2016.

Dr Kibble worked at the National Physical Laboratory (NPL) from 1967 to 1998 as an experimental physicist, and was made an NPL Individual Merit Fellow in 1985. He was instrumental in reshaping the International System of Units (SI), and is best known for his conception of the watt balance, one of the measurement approaches proposed for the redefinition of the kilogram. Dr Kibble will be dearly missed by the international measurement community, with former colleagues citing his quiet and patient guidance, and praising his problem-solving skills.

Before NPL

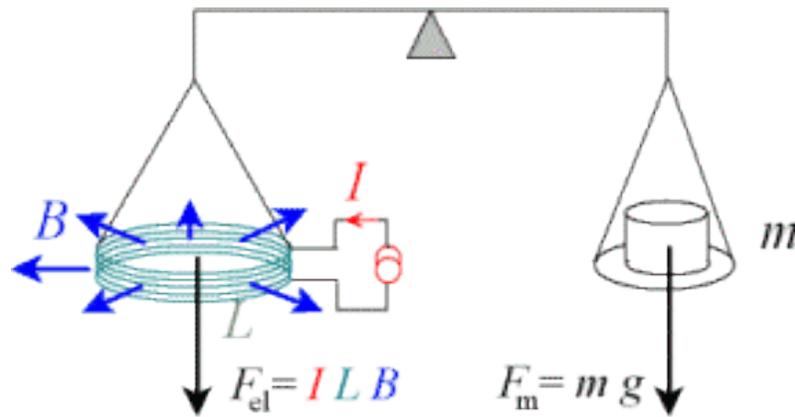
Dr Kibble was born in 1938 in Berkshire. He studied Physics at Jesus College, University of Oxford, where he was awarded a DPhil in 1964 for research in atomic spectroscopy. Dr Kibble continued his research as a Postdoctoral Fellow at the University of Windsor in Ontario, Canada, from 1965 to 1967, before joining NPL as a Senior Research Fellow in 1967.



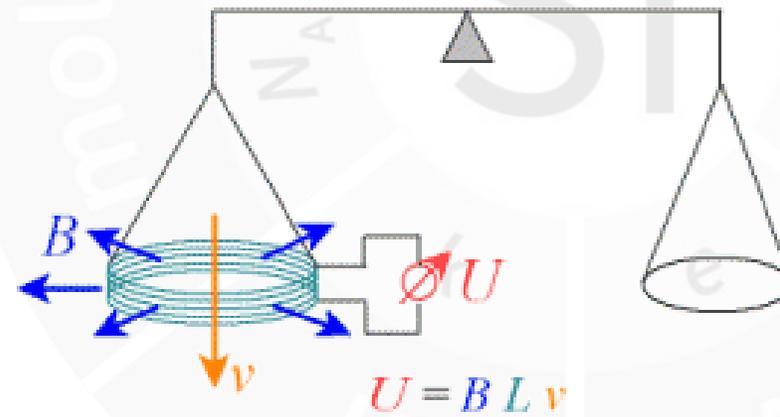
<http://www.npl.co.uk/news/in-memory-of-dr-bryan-kibble-1938-2016>

Balanza de Kibble

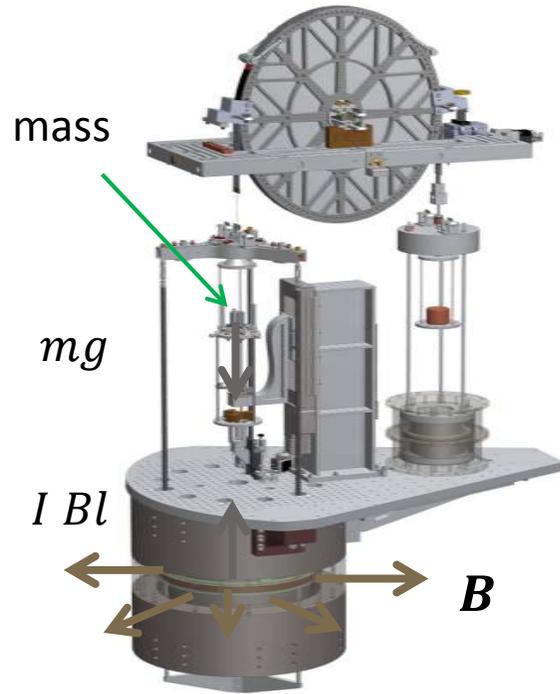
Modo de fuerza



Modo de velocidad



Modo de Fuerza



$$mg = I Bl$$

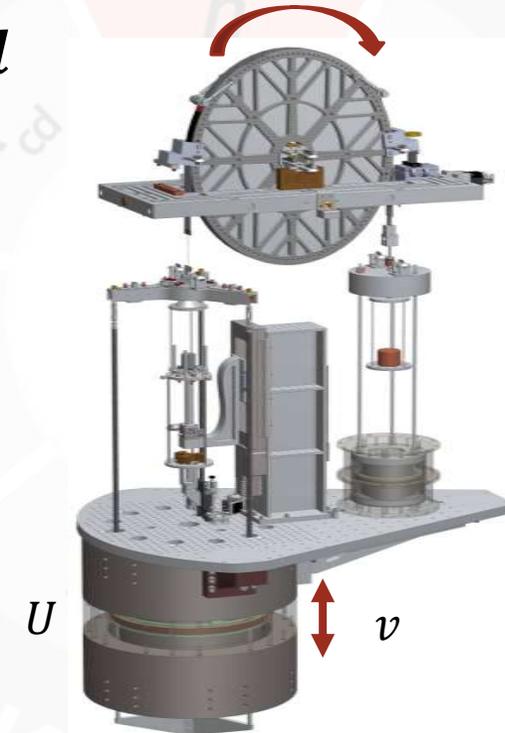
$$U = v Bl$$

$$\frac{mg}{U} = \frac{I}{v}$$

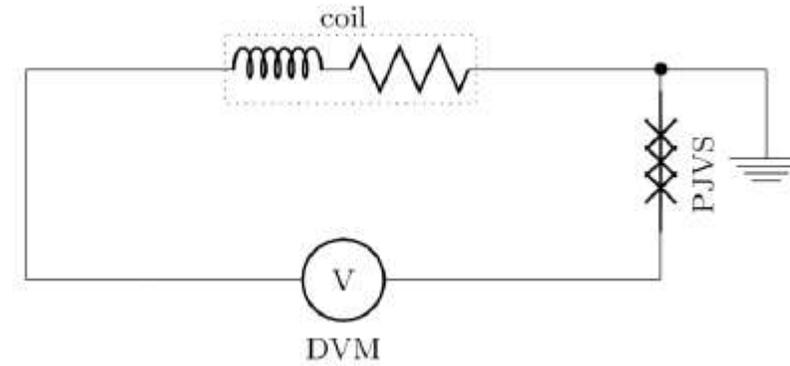
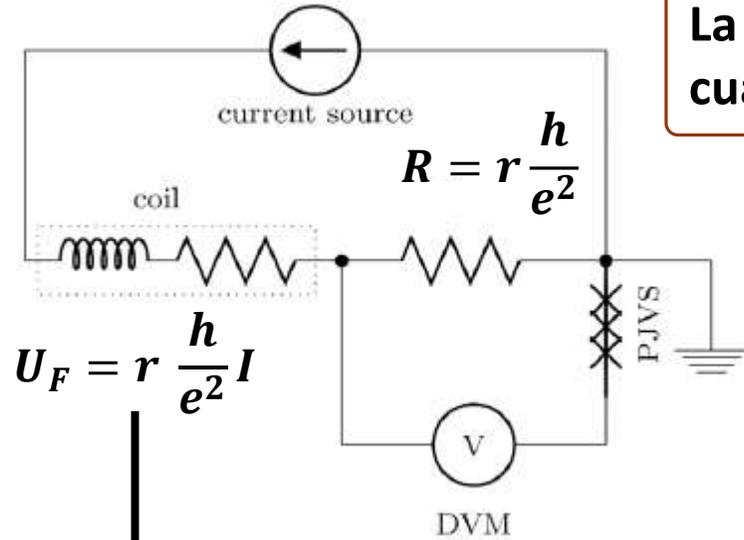
$$mgv = UI$$

Potencia Mecánica = Potencia Eléctrica

Modo de Velocidad



La potencia eléctrica se mide con patrones cuánticos, i.e., *Efecto Josephson* y *Efecto Hall*.



$$U_F = r \frac{h}{e^2} I$$

$$U_F = n_2 \frac{h}{2e} f_2$$

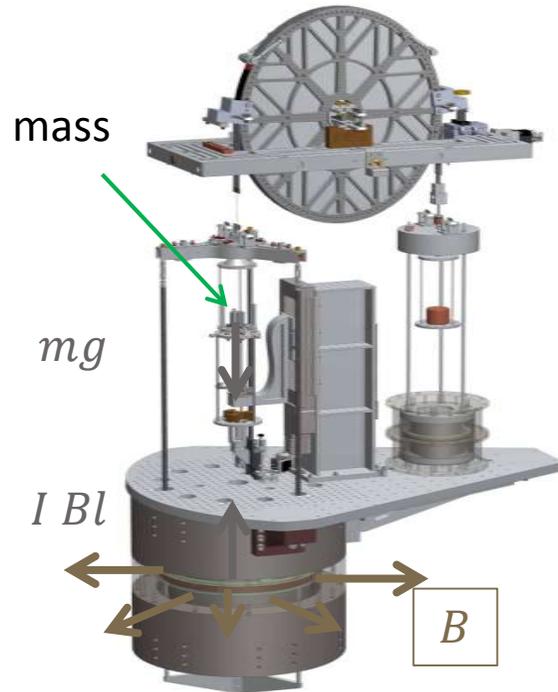
$$I = \frac{n_2}{2r} e f_2$$

$$P = UI$$

$$P = \frac{n_1 n_2}{4r} f_1 f_2 h$$

La potencia eléctrica puede medirse como el producto de dos frecuencias y la constante de Planck.

Modo de Fuerza



$$mg = I Bl$$

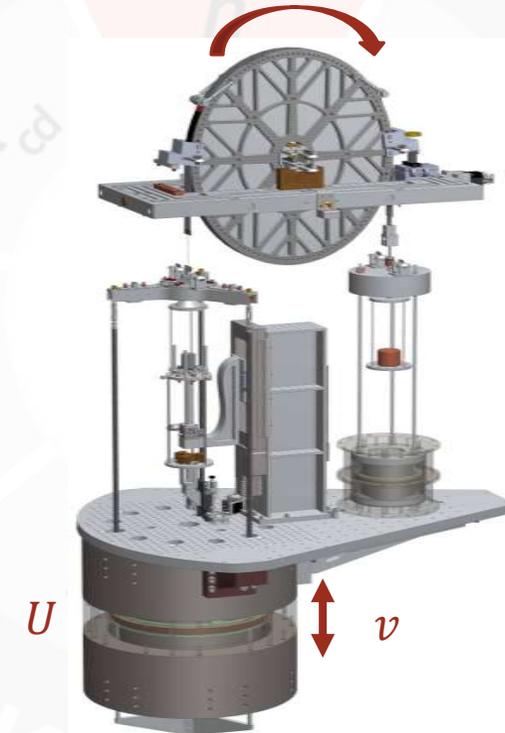
$$\frac{mg}{U} = \frac{I}{v}$$

$$mgv = UI$$

$$mgv = \frac{n_1 n_2}{4r} f_1 f_2 h$$

$$m = \frac{n_1 n_2}{4r} \frac{f_1 f_2}{gv} h$$

Modo de Velocidad



$$U = v Bl$$

Método XRCD

Densidad de Cristal por Rayos X



El proyecto de Avogadro

El proyecto de la Coordinación Internacional de Avogadro (**IAC**), formalmente inició como un esfuerzo internacional cuyo objetivo fue la determinación de la constante de Avogadro N_A con una incertidumbre relativa igual o menor a 2×10^{-8} utilizando cristal de silicio isotópicamente enriquecido.



$$N_A = 6.022\,140\,82 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} \quad u_{\text{rel}} = 3.0 \times 10^{-8} \text{ (2011)}$$

$$N_A = 6.022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} \quad u_{\text{rel}} = 2.0 \times 10^{-8} \text{ (2015)}$$

Realización del kilogramo por el método de densidad de cristal por rayos X (X-ray-crystal-density, XRCD)

El concepto del método XRCD proviene de la idea clásica de que la masa de una sustancia pura puede ser expresada en términos de un número de entidades elementales de dicha sustancia.

El número de entidades elementales puede ser medido con el apoyo del método XRCD.

Para este proyecto se utilizan mono-cristales de silicio (^{28}Si), porque se pueden obtener grandes cristales de alta pureza y sin dislocaciones.

Esto se alcanza utilizando tecnologías de crecimiento de cristal para la industria de semiconductores.

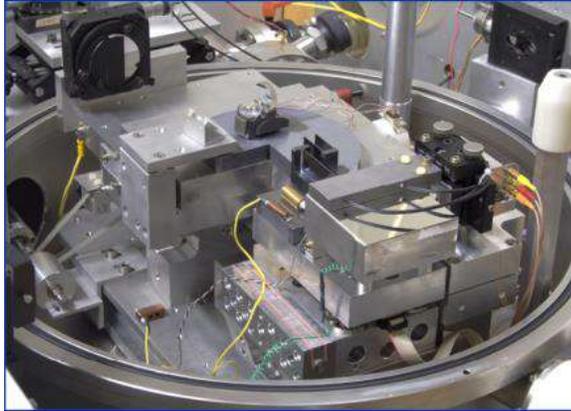


El número de átomos de silicio de un cristal macroscópico (p.ej. una esfera), es igual al volumen macroscópico V_s dividido por el volumen medio microscópico de la celda unitaria V_c multiplicado por el número de átomos de cada celda unitaria.

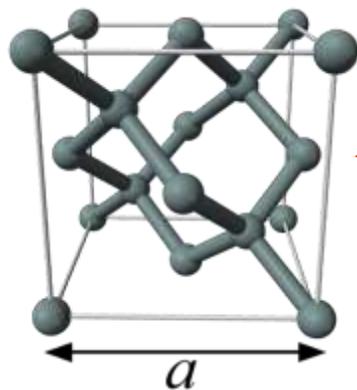
Para lo cual se asume que el cristal contiene sólo el isótopo ^{28}Si .

$$N = 8 \frac{V_s}{V_c}$$

Método XRCD



Medición de a



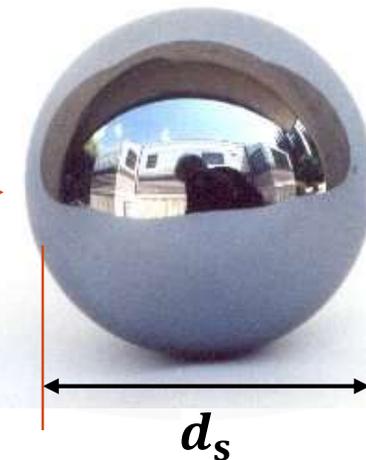
$$V_c = a(^{28}\text{Si})^3$$

Interferometría



Medición de d_s

$$V_s = \frac{1}{6} \pi d_s^3$$



La masa del cristal macroscópico de silicio, $m(\text{Si}_s)$, puede ser calculada como la multiplicación del número de átomos de silicio por la masa del átomo individual,

$$m(\text{Si}_s) = N m(^{28}\text{Si})$$

$$m(\text{Si}_s) = h N \left(\frac{m(^{28}\text{Si})}{h} \right)$$

La masa de un átomo de un isótopo de silicio 28 se calcula por:

$$m(^{28}\text{Si}) = \frac{A_r(^{28}\text{Si})}{N_A}$$

La relación entre la **constante de Avogadro** y la **constante de Planck**

$$N_A h = \frac{\alpha^2 M(e) c}{2 R_\infty}$$

h Constante de Planck
 $A_r(^{28}\text{Si})$ Masa atom. relativa ^{28}Si
 $M(e)$ Masa molar del electrón

c Velocidad de la luz en el vacío
 α Constante de estructura fina
 R_∞ Constante de Rydberg

Masa de una esfera de silicio, ^{28}Si

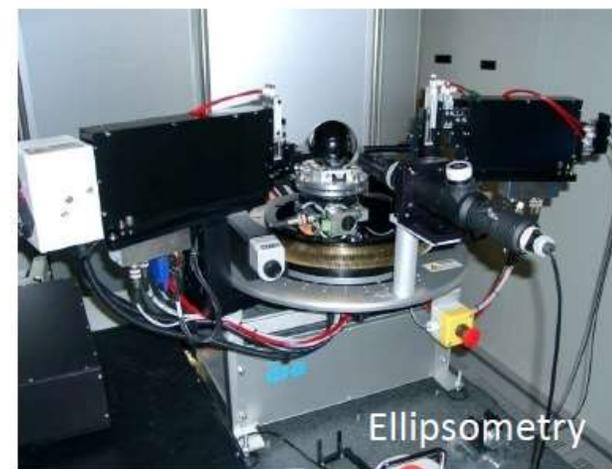
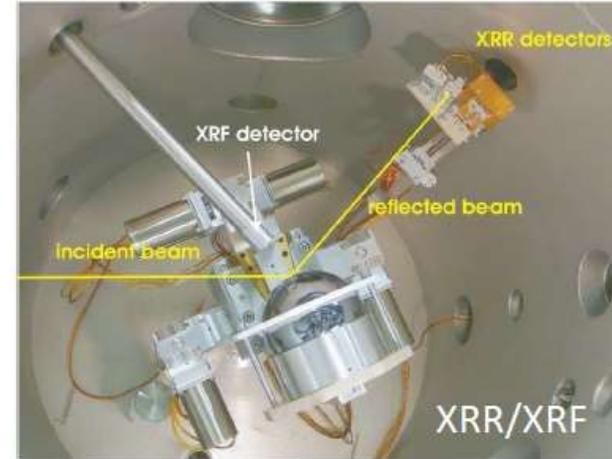
$$m(\text{Si}_s) = \frac{1}{N_A} \sum_i x(^i\text{Si}) A_r(^i\text{Si}) \frac{8V_s}{V_c} - \Delta m_{\text{deficit}} + \Delta m_{\text{SL}}$$

$\Delta m_{\text{deficit}}$ Corrección de masa por vacantes e impurezas en el cristal

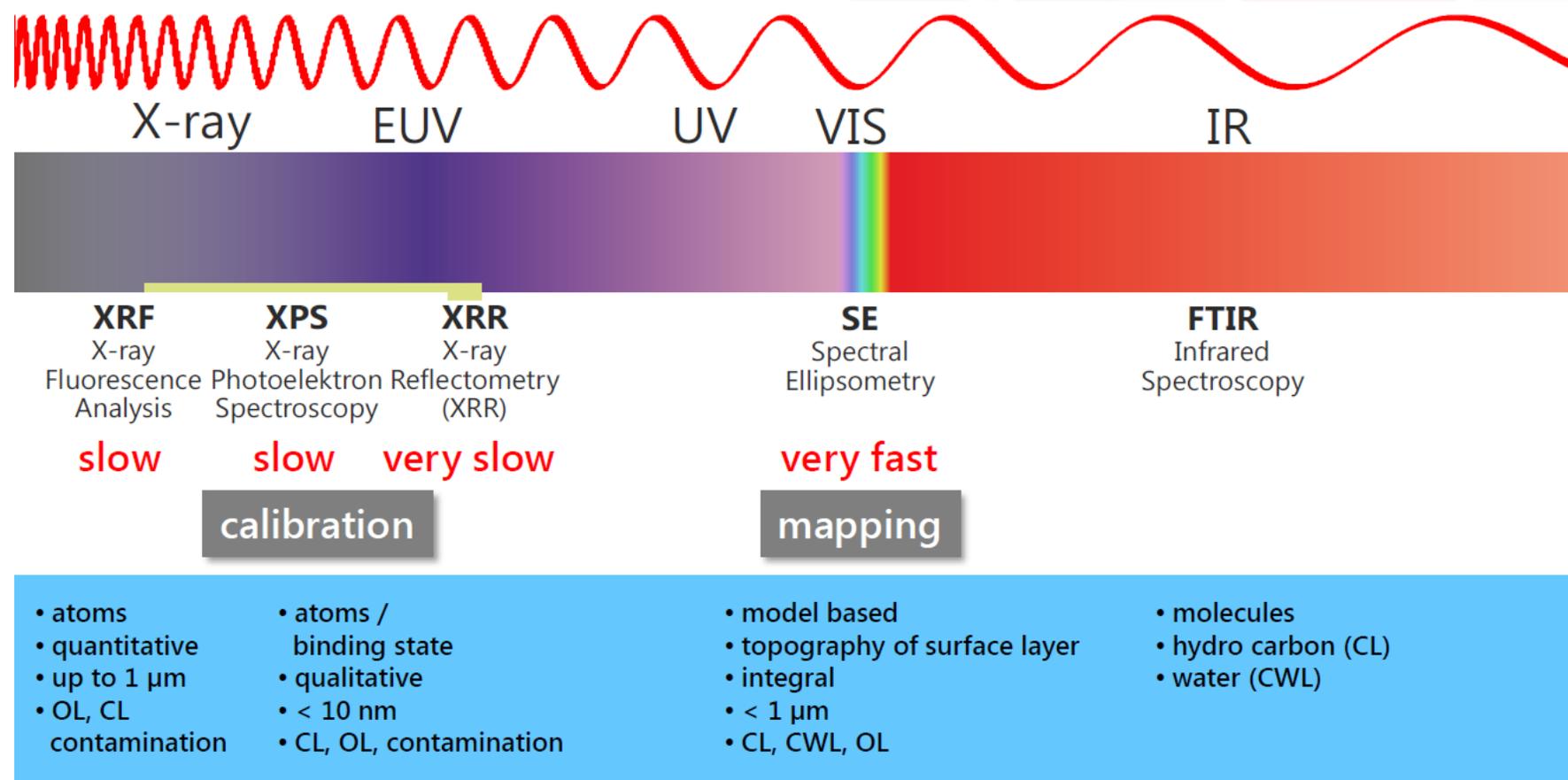
Δm_{SL} Corrección de masa debido a las capas superficiales

Modelo de capas superficiales en un cristal de silicio

Surface	Mass	Method
Carbon	15 μg	XRF, XPS, IR
Water	8 μg	Gravimetric
Si oxide	70 μg	XPS, XRF, XRR, SE
Metals	< 1 μg	XRF
Si crystal		



Métodos para el análisis de superficie de las esferas



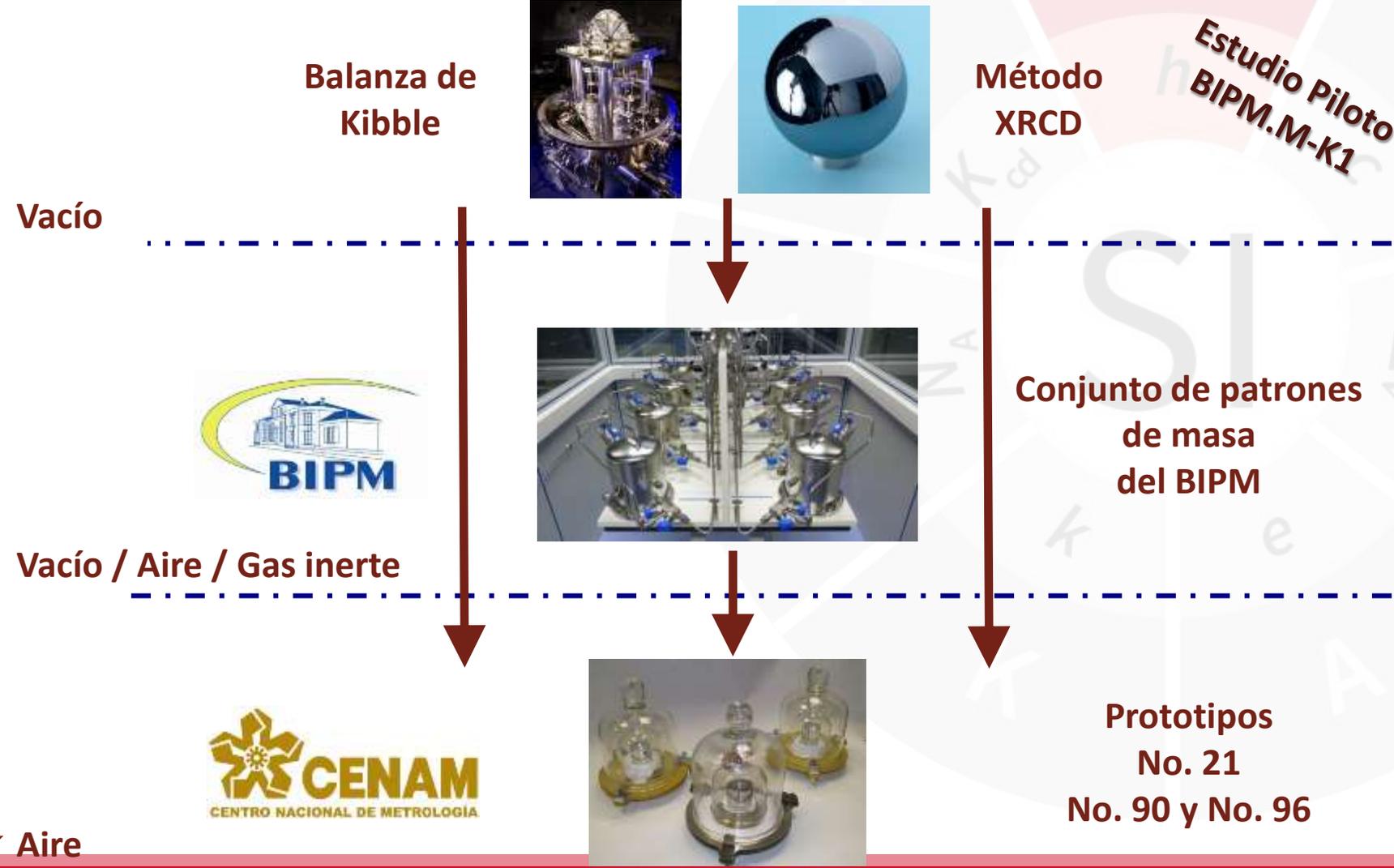


Conjunto de patrones de masa del BIPM



Material \ Ambiente	Platino Iridio 1 kg	Acero Inoxidable 1 kg	Silicio Natural 1 kg	Pila de discos 1 kg
Aire	√	√	√	Pt-Ir
Vacío	√	√	√	Si
Nitrógeno	√	√	√	A. Inox.
Argón	√	√	√	A. Inox.

SI
TRAZABILIDAD DESPUÉS DE LA REDEFINICIÓN



Ventajas adicionales de la Redefinición del kilogramo

- Una vez redefinido el kilogramo, ya no se tendrá que escalar la masa a partir de 1 kg, (múltiplos y submúltiplos)
- Se podrá realizar la medición la masa de un átomo individual con precisión similar a la que se podría medir un objeto de 1 kg

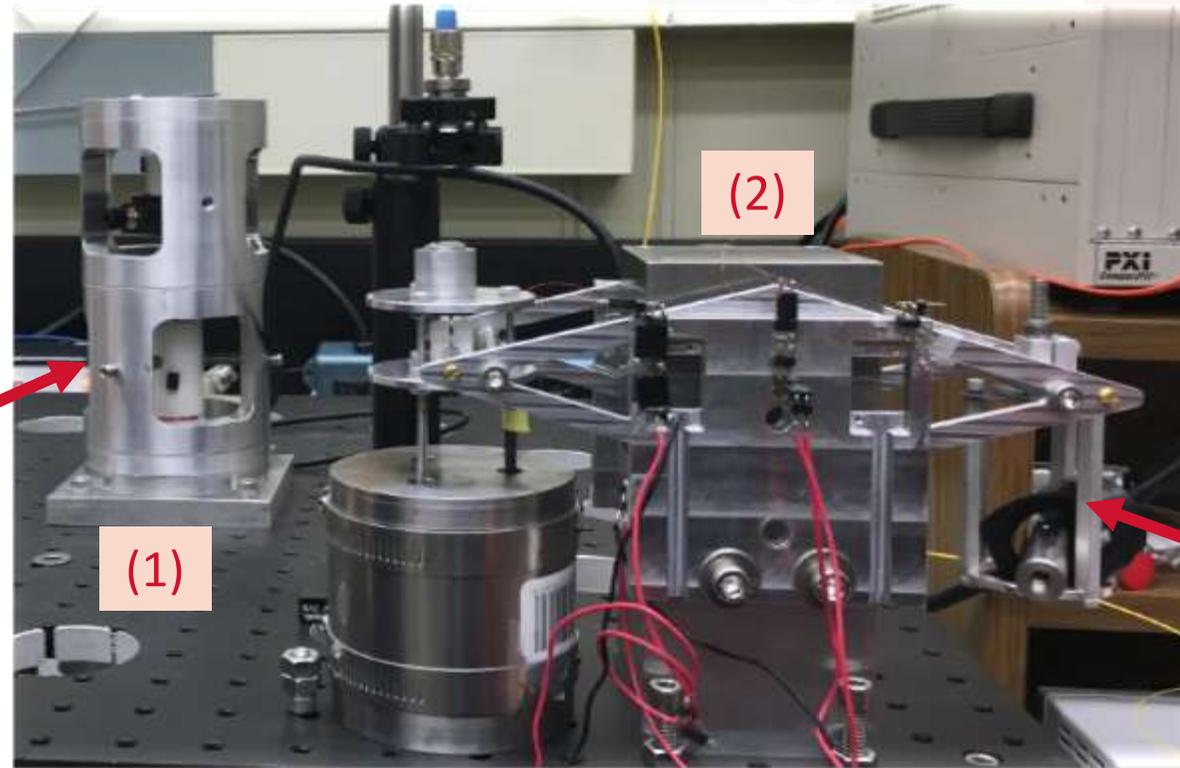
Balanzas de Kibble de Mesa

LEGO® Watt Balance

NIST – USA



Balanzas de Kibble de Mesa



(1) Balanza de Kibble de mesa tipo sismómetro

(2) Balanza de Kibble de mesa de brazos iguales.

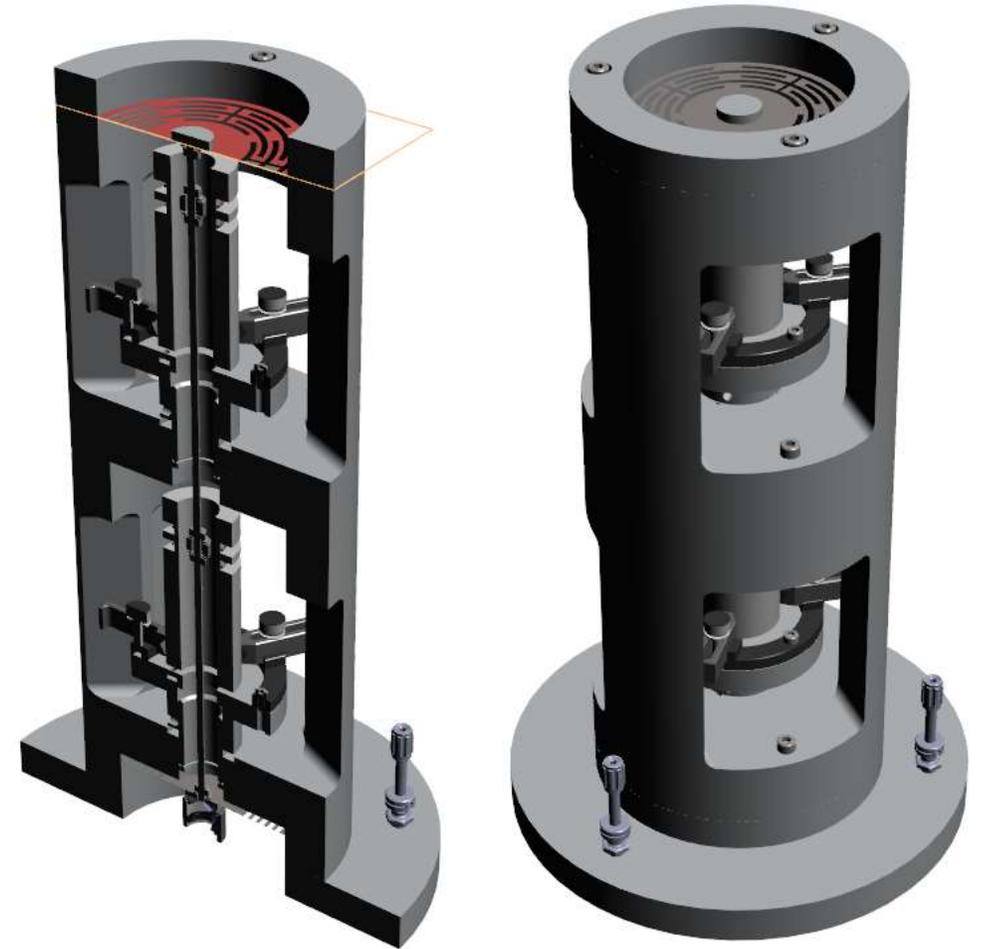
Proyecto conjunto desarrollado entre el **NIST – USA** y **CENAM – México**.

Balanzas de Kibble de Mesa

Balanza de Kibble de Mesa
tipo Sismómetro

CENAM – México

En fase de desarrollo



Balanzas de Kibble de Mesa

Segundo prototipo de la Balanza de Kibble de mesa tipo Sismómetro

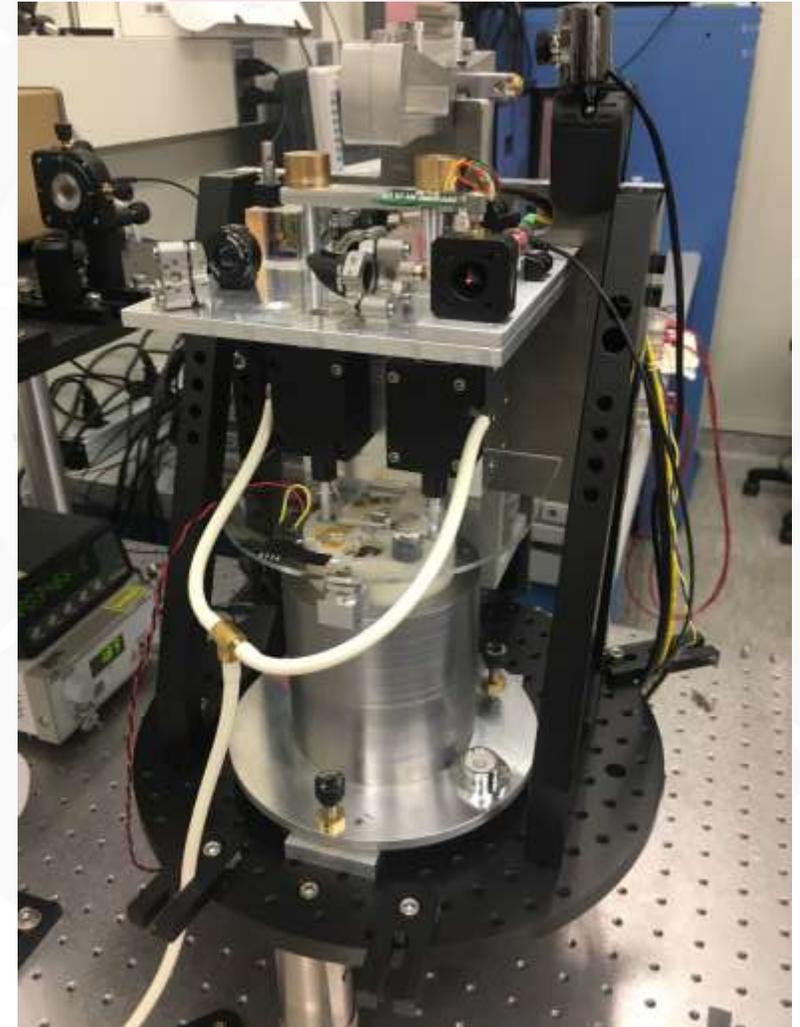
NIST – USA



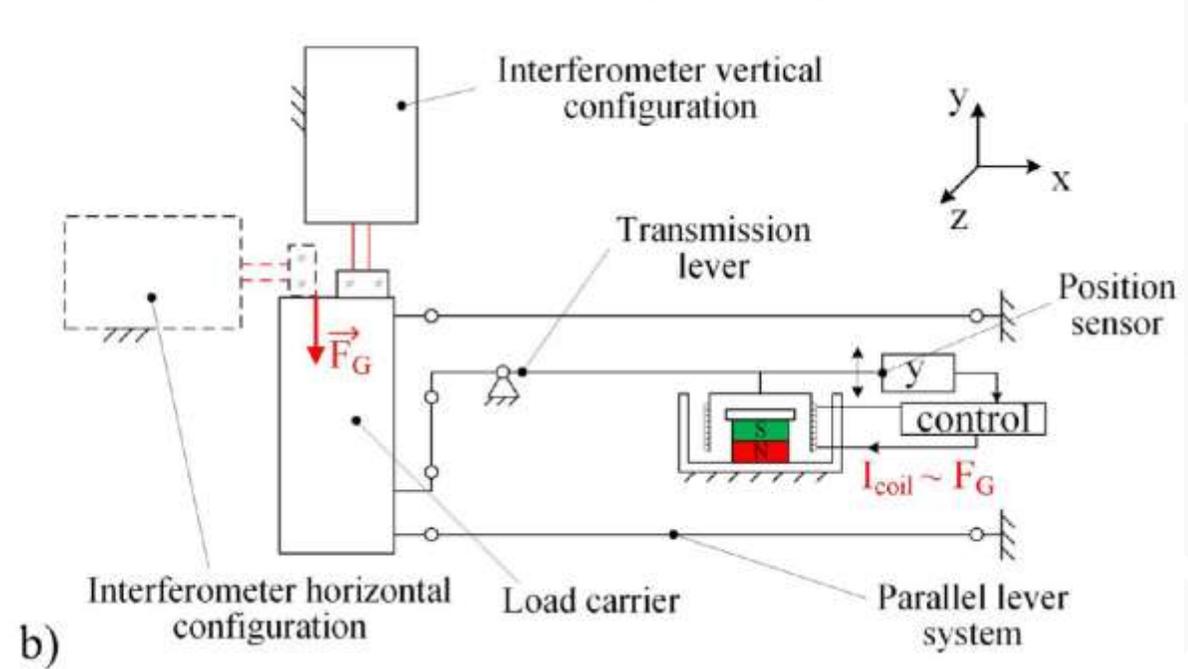
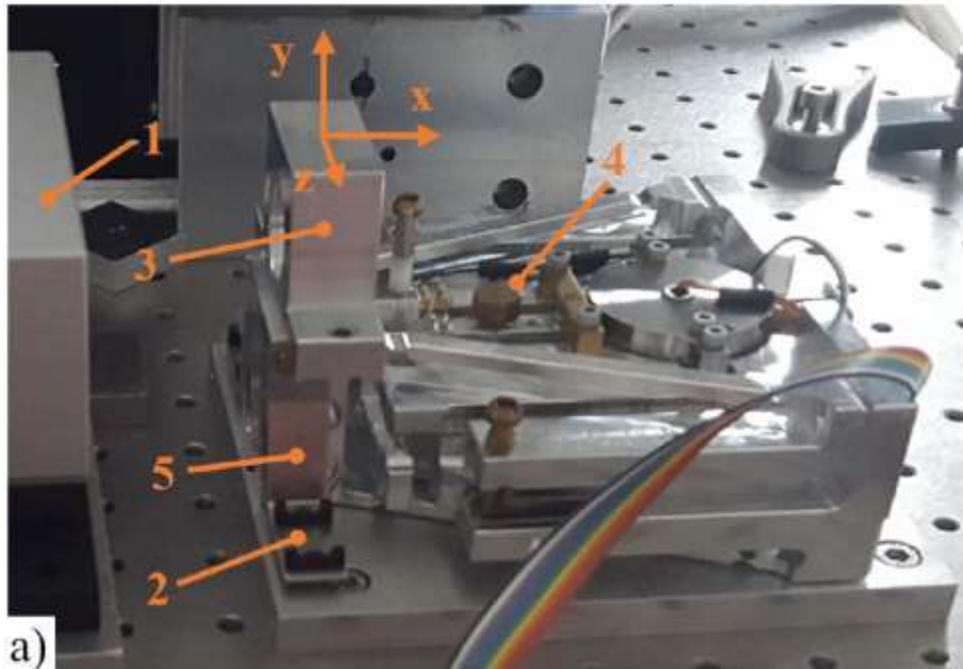
Balanzas de Kibble de Mesa

Prototipo de la Balanza de Kibble de
mesa de brazos desiguales

NIST – USA



Balanzas de Kibble de Mesa



Prototipo de la Balanza de Planck

Proyecto desarrollado entre el **PTB** y **Technische Universität Ilmenau – Alemania.**

Otras realizaciones con el método XRCD

Simple recipe for realizing a redefined kilogram

1. Aluminum has one stable isotope, so get a rod of aluminum (thermometry have high purity ones for fixed points)
2. Cut the rod into a smaller cylinder
3. Measure the height and diameter of the cylinder
4. Calculate its volume using: $V = \pi r^2 h$
5. Get some values from the CRC handbook or other dependable source (derived from traceable measurements)
6. Calculate the mass of the cylinder using:

$$m = (M_m / N_A) \cdot (V / v_0)$$

Congratulations! You have realized the kilogram (unit)



Measurement science and standards

How well does it work for a 5g nominal mass?



$$m = \frac{M_m V}{N_A v_0}$$

V is the volume of the cylinder ($\pi r^2 h$) 1.855 cm³
 Measured radius r 0.6315 cm
 Measured height h 1.481 cm



Measurement science and standards

Otras realizaciones con el método XRCD

How well does it work for a 5g nominal mass?



$$m = \frac{M_m V}{N_A v_0}$$

M_m is the molar mass of aluminum

26.9815 g/mol

N_A is the Avogadro constant

6.02221×10^{23} /mol

v_0 is the volume occupied by an aluminum atom

1.6601×10^{23} cm³

Atom/unit Cell (fcc) 4

lattice constant 4.0495 Å

How well does it work for a 5g nominal mass?



$$m = \frac{M_m V}{N_A v_0}$$

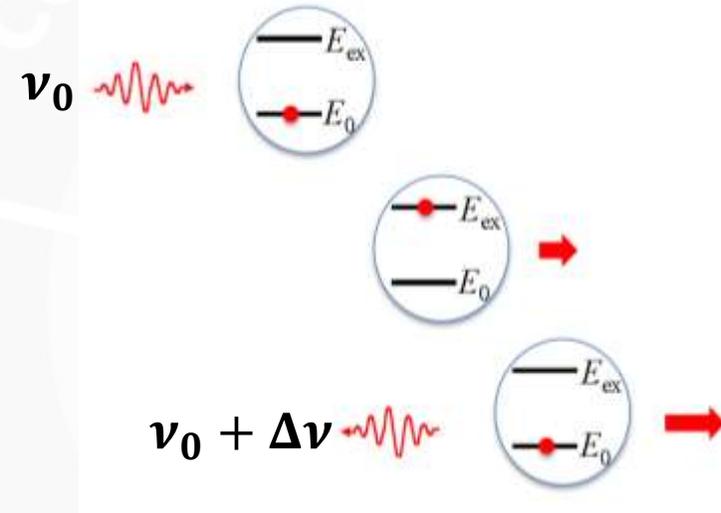
Calculated mass 5.008 g

Measured mass 5.003 g

error ~0.1 % !!

¿Cómo pesar un átomo?

- Se atrapa y se enfría el átomo para que esté en "reposo"
- Se ilumina el átomo con una frecuencia ν_0 , por lo que el átomo absorbe un fotón y experimenta un cambio de momento
- Se mide el desplazamiento de frecuencia Doppler $\Delta\nu$ de los fotones emitidos (un experimento de frecuencia medido a unas partes en 10^9)
- Se calcula la masa con la siguiente expresión:



$$m_{at} = \frac{2h \nu_0^2}{c^2 \Delta\nu} \left(1 - \frac{\Delta\nu}{2\nu_0} + \dots \right)$$

Más ventajas de la definición del kilogramo hacia la constante de Planck en el nuevo SI:

- El kilogramo estará disponible **para todos** y **en cualquier momento** y **en cualquier lugar**.
- Una constante fundamental (***h***) no cambia su valor no importa cuántas veces se utilice o se aplique este fenómeno de la naturaleza.
- La masa ya no dependerá de la estabilidad de un artefacto (IPK).
- La nueva definición es independiente de la escala, esto es, se pueden hacer realizaciones primarias en cualquier valor de masa (no solo en 1 kg) con exactitudes de algunas partes en 10^8 (**o mejores!!!**).
- El nuevo SI deja abierta la posibilidad para medir (realizar) la masa sin importar el experimento o método utilizado, la única condición es que la masa **sea trazable** a la **constante de Planck**.

En conclusión...

- Para todos, después de la redefinición de la unidad de masa, un **kilogramo seguirá siendo exactamente un kilogramo** en el nuevo SI, con la diferencia que ahora tendrá una incertidumbre que dependerá del experimento utilizado para su realización (actualmente $\approx 10 \mu\text{g}$ en 1 kg).
- El nuevo SI deja abierta la posibilidad para medir (realizar) la masa sin importar el experimento o método utilizado, la única condición es que la masa **sea trazable** a la **constante de Planck**.

¡ GRACIAS POR SU ATENCIÓN !

M. en C. y T. Luis Manuel Peña Pérez
lpena@cenam.mx