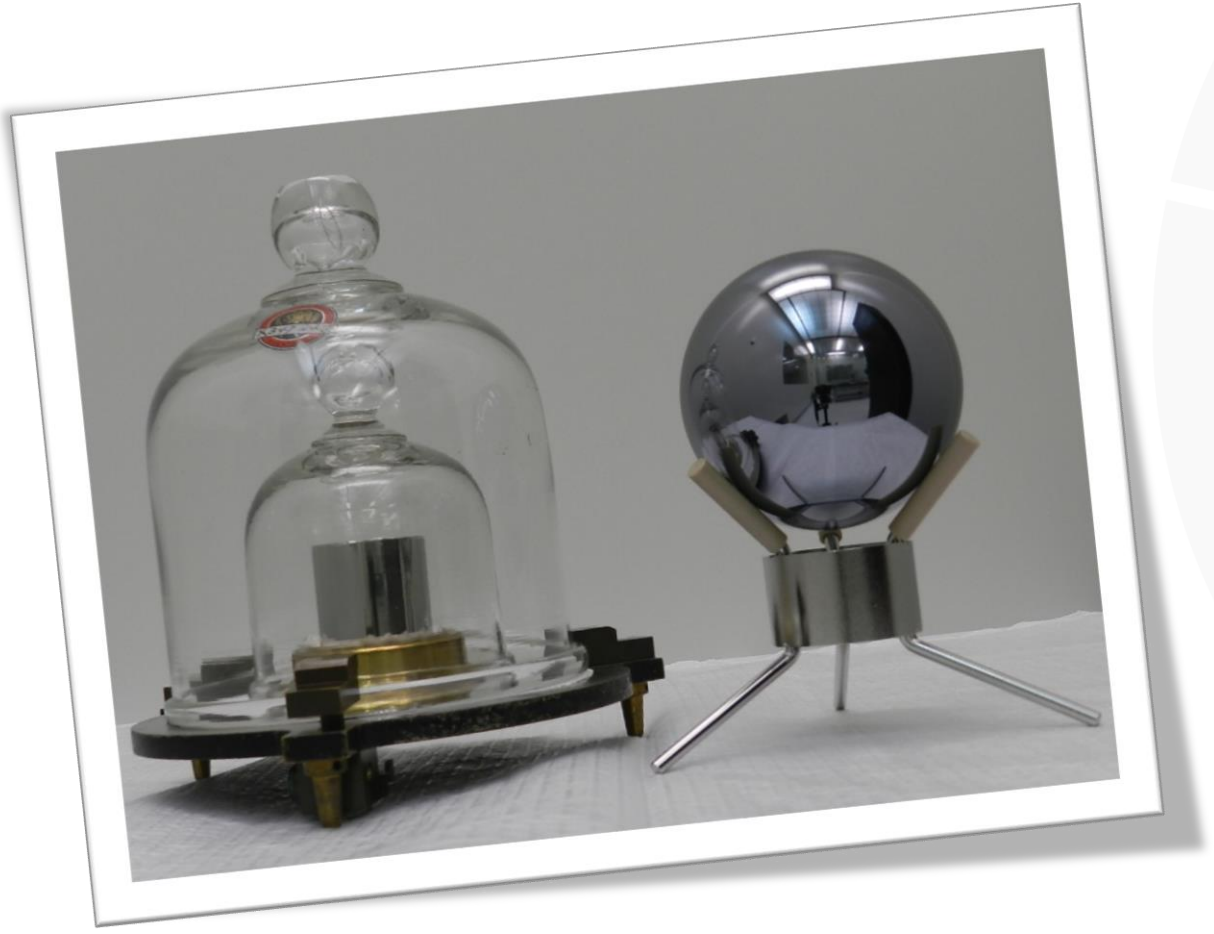
CENAM
CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA

EL CLUB DE LA BALANZA



El cambio en la definición del kilogramo: Nuevo SI

M. en C. Luis Omar Becerra Santiago

CENAM
CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA

EL CLUB DE LA BALANZA

Revisión del Sistema Internacional de Unidades

A TOUS LES TEMPS

PARA TODOS LOS TIEMPOS

A TOUS PEUPLES

PARA TODOS LOS PUEBLOS

CENAM
CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA

EL CLUB DE LA BALANZA

Fechas importantes para el Sistema Internacional de Unidades

Año	Suceso
1799	Se establece el Sistema Métrico en Francia
1875	Se firma el Tratado del Metro
1889	Se definen el metro, el kilogramo y el segundo
1948	Se define el ampere
1954	Se define el kelvin y la candela
1960	Se establece el Sistema Internacional de Unidades
1967	Se define el segundo en función de la frecuencia hiperfina del átomo de Cs 133 y se redefinió la candela
1971	Se define al mol como unidad de base
1983	Se define el metro en función de la velocidad de la luz en vacío
2011	Se propone revisar las definiciones de las unidades del SI
2014	Se reafirma la intención de redefinir el kilogramo, el ampere, el kelvin y el mol
2018	Se redefinirán el kilogramo, el ampere, el kelvin y el mol

El Sistema Internacional de Unidades SI, se está revisando para **actualizar las definiciones de cuatro de las siete unidades de base**.

En **noviembre de 2018**, se espera que la Conferencia General de Pesas y Medidas (CGPM) apruebe las definiciones revisadas del **kilogramo, el ampere, el kelvin y el mol.**

La CGPM es el organismo internacional responsable de la comparabilidad global de las mediciones. Las definiciones revisadas se espera que entren en vigor el **20 de mayo de 2019.**

¿Por que revisar las definiciones de las unidades de base del SI?

1. De las siete unidades de base del SI, **solo el kilogramo se define todavía en términos de un artefacto material**, el prototipo internacional mantenido en el BIPM. La principal desventaja de la definición actual del kilogramo es que se refiere a la masa del artefacto que, por su propia naturaleza, sabemos que no puede ser absolutamente estable.

2. **Las incertidumbres de todas las unidades eléctricas SI** realizadas directa o indirectamente por medio de los efectos Josephson y el efecto cuántico Hall junto con los valores SI de las constantes Josephson y von Klitzing **se reducirían significativamente si el kilogramo se redefiniera para vincularse a un valor numérico exacto de la constante de Planck, y si el ampere se redefiniera para vincularlo a un valor numérico exacto de la carga elemental.**

¿Por que revisar las definiciones de las unidades de base del SI?

3. **El kelvin se define actualmente en términos de una propiedad intrínseca del agua** que, si bien es un invariante de la naturaleza, en la práctica depende de la pureza y la composición isotópica del agua utilizada. **El kelvin se definiría mejor si estuviera vinculado a un valor numérico exacto de la constante de Boltzmann.**

4. **La redefinición del mol** para que esté vinculado a un **valor numérico exacto de la constante de Avogadro** tendría como consecuencia ya no depender de la definición del kilogramo, incluso cuando el kilogramo se defina de manera que esté vinculado a un valor numérico exacto de la constante de Planck. **Esto enfatizaría así la distinción entre las magnitudes "cantidad de sustancia" y "masa".**

¿Por que revisar las definiciones de las unidades de base del SI?

5. **La incertidumbre** de los valores de muchas **otras constantes fundamentales importantes y factores de conversión de energía** se eliminarían o reducirían en gran medida si la **constante de Planck, la carga del electrón, la constante de Boltzmann y la constante de Avogadro tuvieran valores numéricos exactos** cuando se expresaran en unidades SI.

Las definiciones revisadas se basarán en siete constantes físicas y por lo tanto serán inherentemente estables.

Unidad de base del SI	Constante definitoria
segundo	Frecuencia de transición hiperfina del Cs 133, $\Delta\nu_{Cs}$
metro	Velocidad de la luz, c
kilogramo	Constante de Planck, h
ampere	Carga elemental, e
kelvin	Constante de Boltzmann, k
mol	Constante de Avogadro, N_A
candela	Eficacia luminosa, K_{cd}

CENAM
CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA

EL CLUB DE LA BALANZA

Constantes definitorias

Constante	Valor numérico	Unidad
Frecuencia de transición hiperfina del Cs 133, $\Delta\nu_{Cs}$	9 192 631 770	Hz = s^{-1}
Velocidad de la luz, c	299 792 458	m s^{-1}
Constante de Planck, h	$6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$	J s = kg m^2 s^{-1}
Carga elemental, e	$1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$	C = A s
Constante de Boltzmann, k	$1.380\,649 \times 10^{-23}$	J K^{-1} = kg m^2 s^{-1} K^{-1}
Constante de Avogadro, N_A	$6.022\,140\,76 \times 10^{23}$	mol^{-1}
Eficacia luminosa, K_{cd}	683	lm W^{-1} = cd sr kg^{-1} m^{-2} s^3

¡Valor numérico fijo y sin incertidumbre!

CENAM
CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA

EL CLUB DE LA BALANZA

Actual SI		Nuevo SI	
Magnitud de base	Unidades de base	Magnitud "de base"	Constante definitoria
Tiempo	segundo	Frecuencia	$\Delta\nu_{Cs}$
Longitud	metro	Velocidad	c
Masa	kilogramo	Acción	h
Corriente eléctrica	ampere	Carga eléctrica	e
Temp. termodinámica	kelvin	Capacidad calorífica	k
Cantidad de sustancia	mol	Cantidad de sustancia	N_A
Intensidad luminosa	candela	Intensidad luminosa	K_{cd}

CENAM
CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA

EL CLUB DE LA BALANZA

Unidades de base expresadas en términos de las constantes definitorias

Magnitud	Unidad	Valor numérico fijo	Constantes
tiempo	1 s	919 263 177 0	$\Delta\nu_{cs}^{-1}$
longitud	1 m	30.663 318 988 498 4	$c\ \Delta\nu_{cs}^{-1}$
masa	1 kg	1.475 521 399 735 27 E+40	$h\ \Delta\nu_{cs}\ c^{-2}$
corriente eléctrica	1 A	6.789 686 817 250 55 E+08	$\Delta\nu_{cs}\ e$
temperatura termodinámica	1 K	2.266 665 264 601 11	$h\ \Delta\nu_{cs}\ k^{-1}$
cantidad de sustancia	1 mol	6.022 140 76 E+23	N_A^{-1}
intensidad luminosa	1 cd	2.614 830 482 285 62 E+10	$\Delta\nu_{cs}^{2}\ h\ K_{cd}$

CENAM
CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA

EL CLUB DE LA BALANZA

Algunas unidades derivadas definidas en función de las constantes definitorias

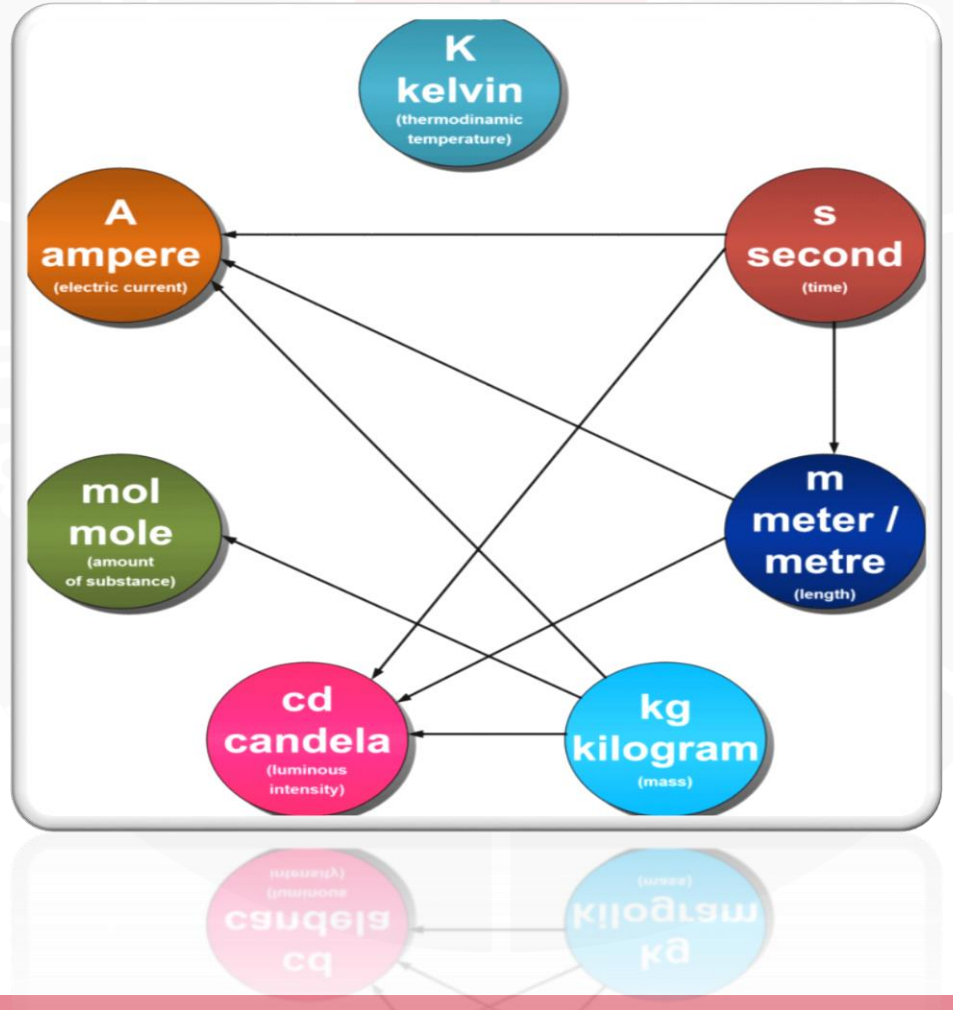
Magnitud	Unidad	Unidades de base	Valor numérico fijo	Constantes
Densidad	1 kg m^{-3}	kg m^{-3}	5.117 855 617 606 82 E+35	$h\,\Delta\nu_{cs}^{\ 4}\ c^{-5}$
Fuerza	1 N	kg m s^{-2}	5.354 081 104 982 70 E+21	$h\,\Delta\nu_{cs}^{\ 2}\ c^{-1}$
Presión, tensión	1 Pa	kg m^{-1} s^{-2}	5.694 382 339 804 56 E+18	$h\,\Delta\nu_{cs}^{\ 4}\ c^{-3}$
Energía, trabajo	1 J	kg m^2 s^{-2}	1.641 738 968 123 76E+23	$h\,\Delta\nu_{cs}$
Potencia, Flujo Radiante	1 W	kg m^2 s^{-3}	1.785 929 219 401 08 E+13	$h\,\Delta\nu_{cs}^{\ 2}$
Dif. de potencial eléctrico	1 V	kg m^2 s^{-3} A^{-1}	2.630 355 813 855 16 E+04	$h\,\Delta\nu_{cs}\,e^{-1}$
Resistencia eléctrica	1 Ω	kg m^2 s^{-3} A^{-2}	3.874 045 864 931 83 E-05	$h\,e^{-2}$
Tensión superficial	1 N m^{-1}	kg s^{-2}	1.746 086 621 278 99 E+20	$h\,\Delta\nu_{cs}^{\ 3}\ c^{-2}$
Viscosidad dinámica	1 Pa s	kg m^{-1} s^{-1}	5.234 636 000 741 43 E+28	$h\,\Delta\nu_{cs}^{\ 3}\ c^{-3}$
Acción	1 J s	kg m^2 s^{-1}	1.509 190 179 642 15 E+33	h

¡Todas las unidades pueden expresarse en términos de una o más de las constantes definitorias¡

CENAM
CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA

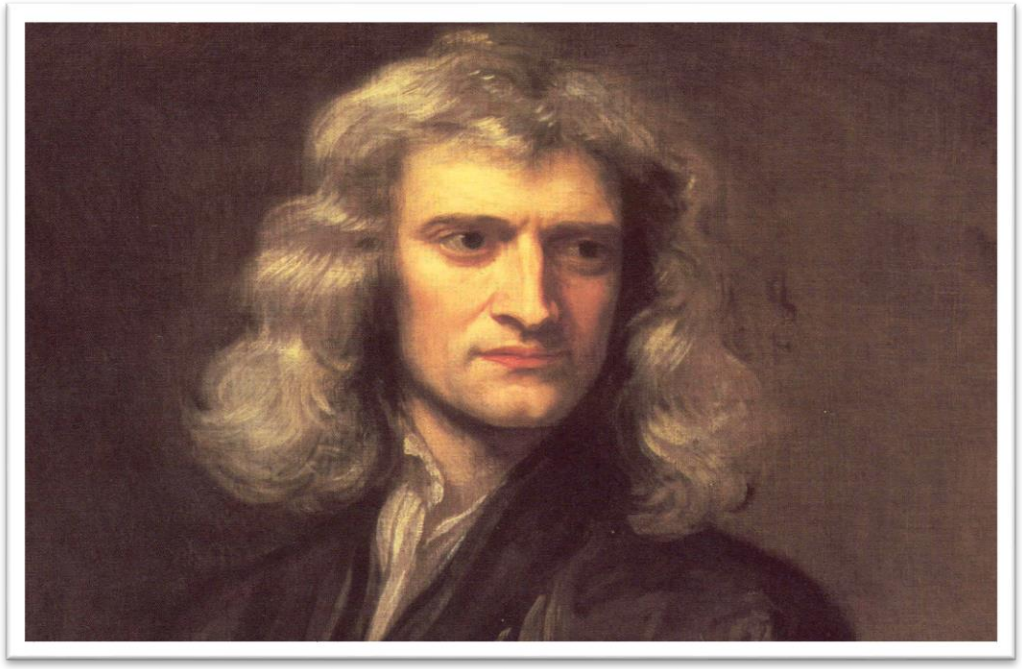
EL CLUB DE LA BALANZA

El kilogramo en el actual Sistema Internacional de Unidades



La masa desde el punto de vista Newtoniano

Isaac Newton publicó en 1687 “Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica”.



Isaac Newton

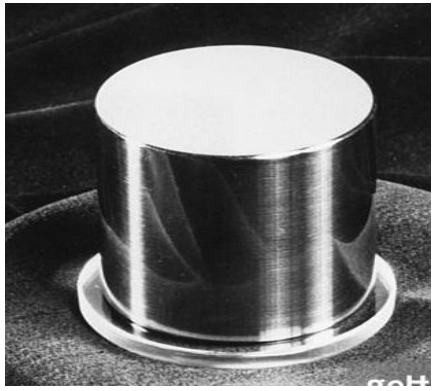
$$F = m\,a$$

Masa inercial

$$F = \frac{G m_1 m_2}{r^2}$$

Masa gravitacional

Para crear un **patrón de masa** desde el punto de vista Newtoniano de la inercia, es necesario tener una fuerza conocida y patrones de longitud y tiempo con los cuales medir la aceleración.



$$F = m\,g$$

El Kilogramo de los Archivos se fabricó en 1799 materializando la masa de un decímetro cúbico de agua a su máxima densidad (a 4 °C), intentando con ello materializar una constante de la naturaleza.

Fue hasta 1889 cuando la primera CGPM, sancionó el Prototipo Internacional del Kilogramo, como la unidad de masa en el entonces Sistema Métrico Decimal, antecesor del moderno Sistema Internacional de Unidades.

CENAM
CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA

EL CLUB DE LA BALANZA

Oficina Internacional de Pesas y Medidas, ubicada en Sévres Francia

El prototipo internacional del kilogramo $\mathcal{K}$ y sus 6 copias oficiales identificadas como: K1, No. 7, No. 8(41), No. 32, No. 43 y No. 47.

CENAM
CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA

EL CLUB DE LA BALANZA

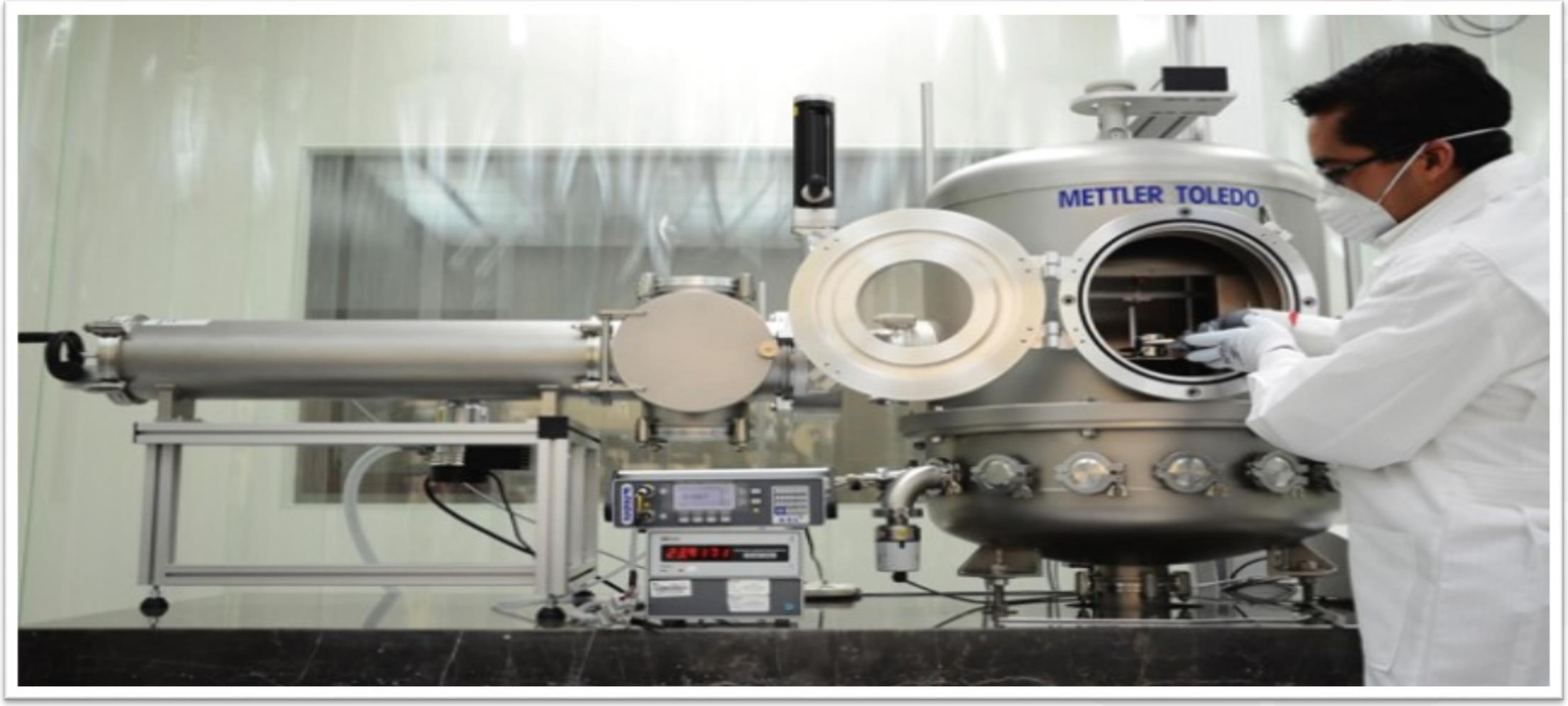
Patrón Nacional de Masa de México

Prototipo No. 21 del kilogramo, asignado por la Oficina Internacional de Pesas y Medidas a los Estados Unidos Mexicanos.

Es un cilindro fabricado de una aleación de aproximadamente 90 % de platino y 10 % iridio, con diámetro y altura de 39 mm.

Asignado a México en 1889, (llegó a nuestro país en 1892)

Patrón nacional de masa k21 (1892) y los patrones k90 (2004) y k96 (2011) mantenidos en el CENAM El Marqués, Querétaro, México



Balanza comparadora de masa de 1 kg de capacidad y 0.1 μg de resolución

SI

TRAZABILIDAD ACTUAL

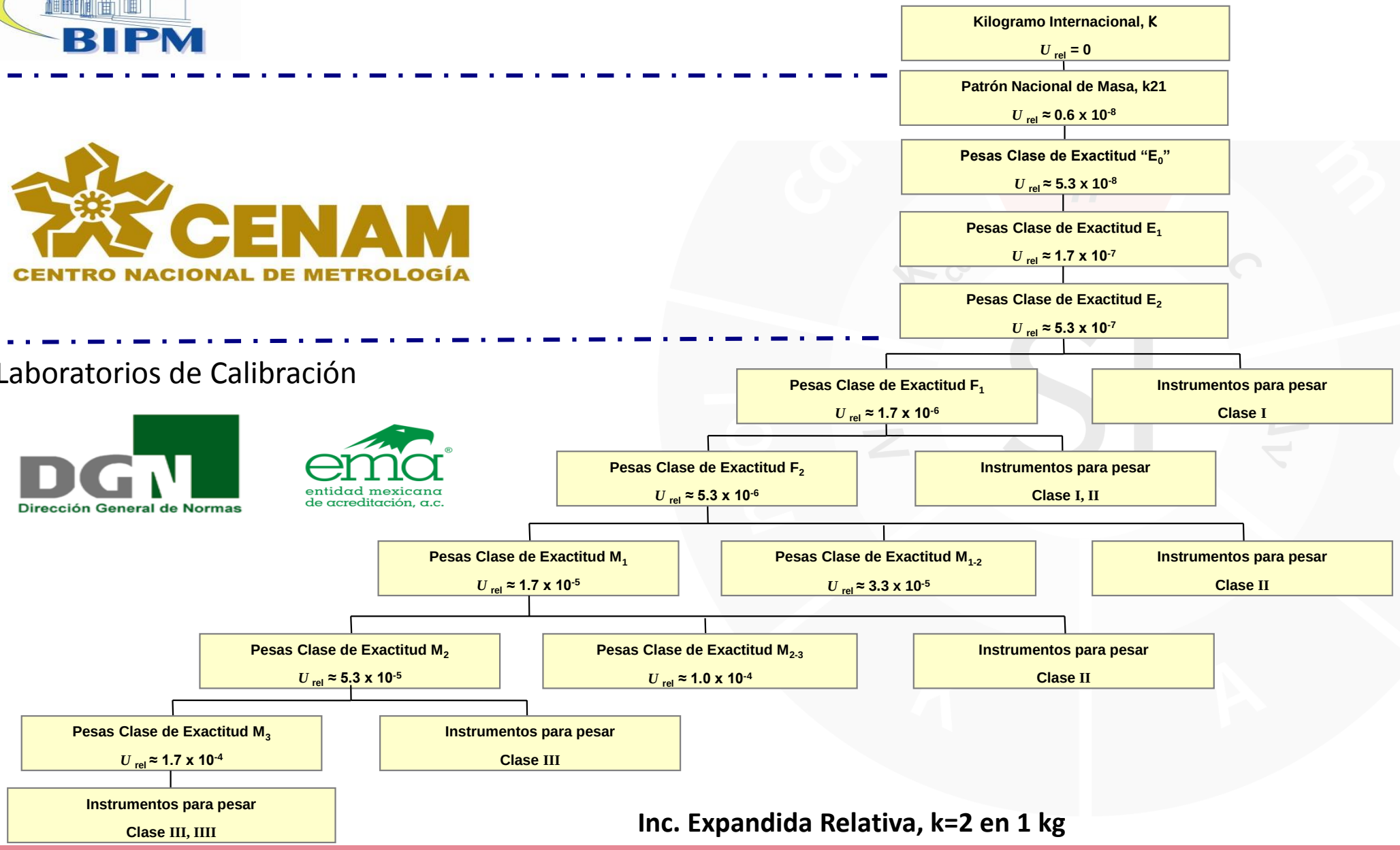
BIPM

CENAM
CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA

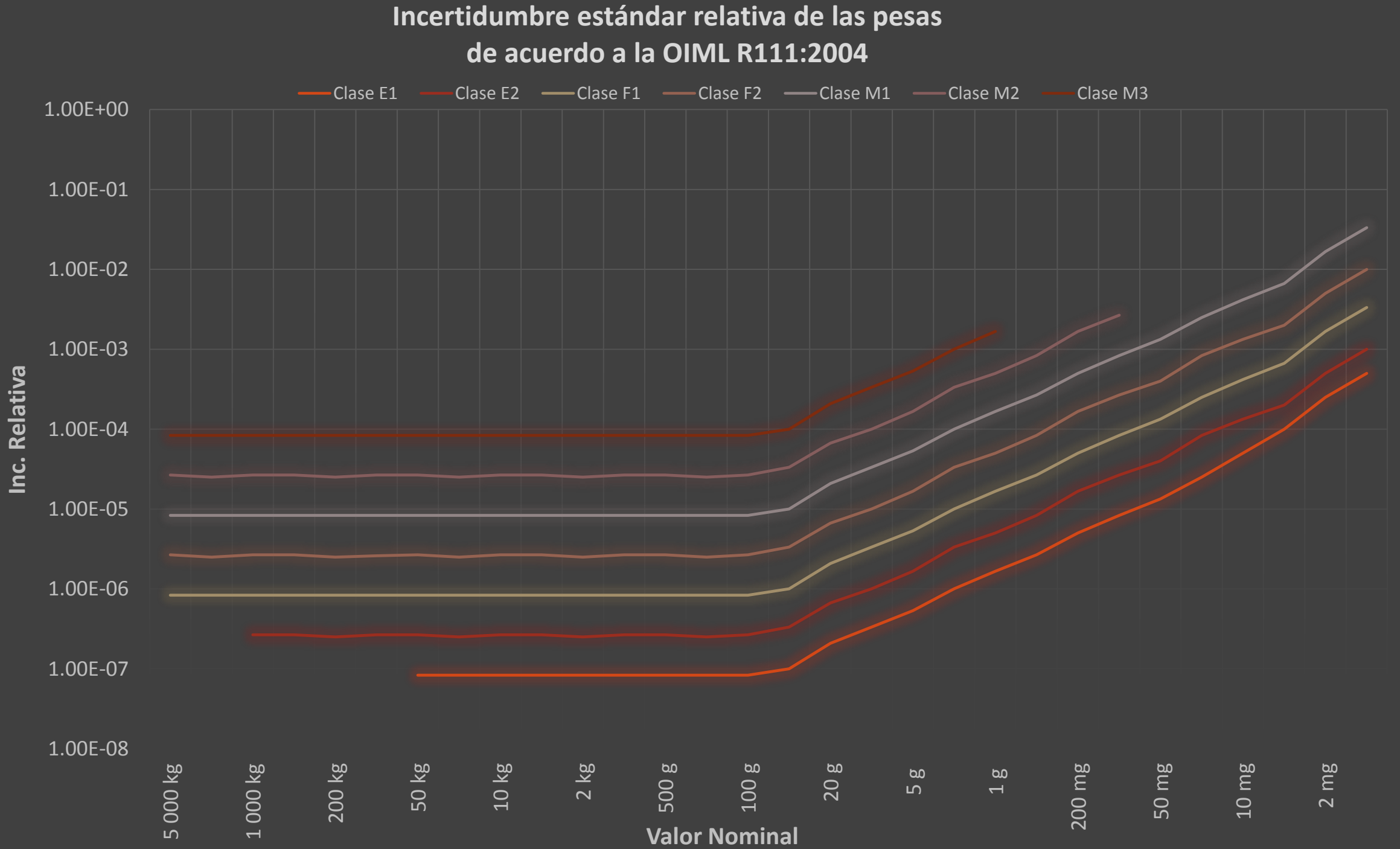
Laboratorios de Calibración

DGN
Dirección General de Normas

ema
entidad mexicana de acreditación, a.c.



Inc. Expandida Relativa, k=2 en 1 kg

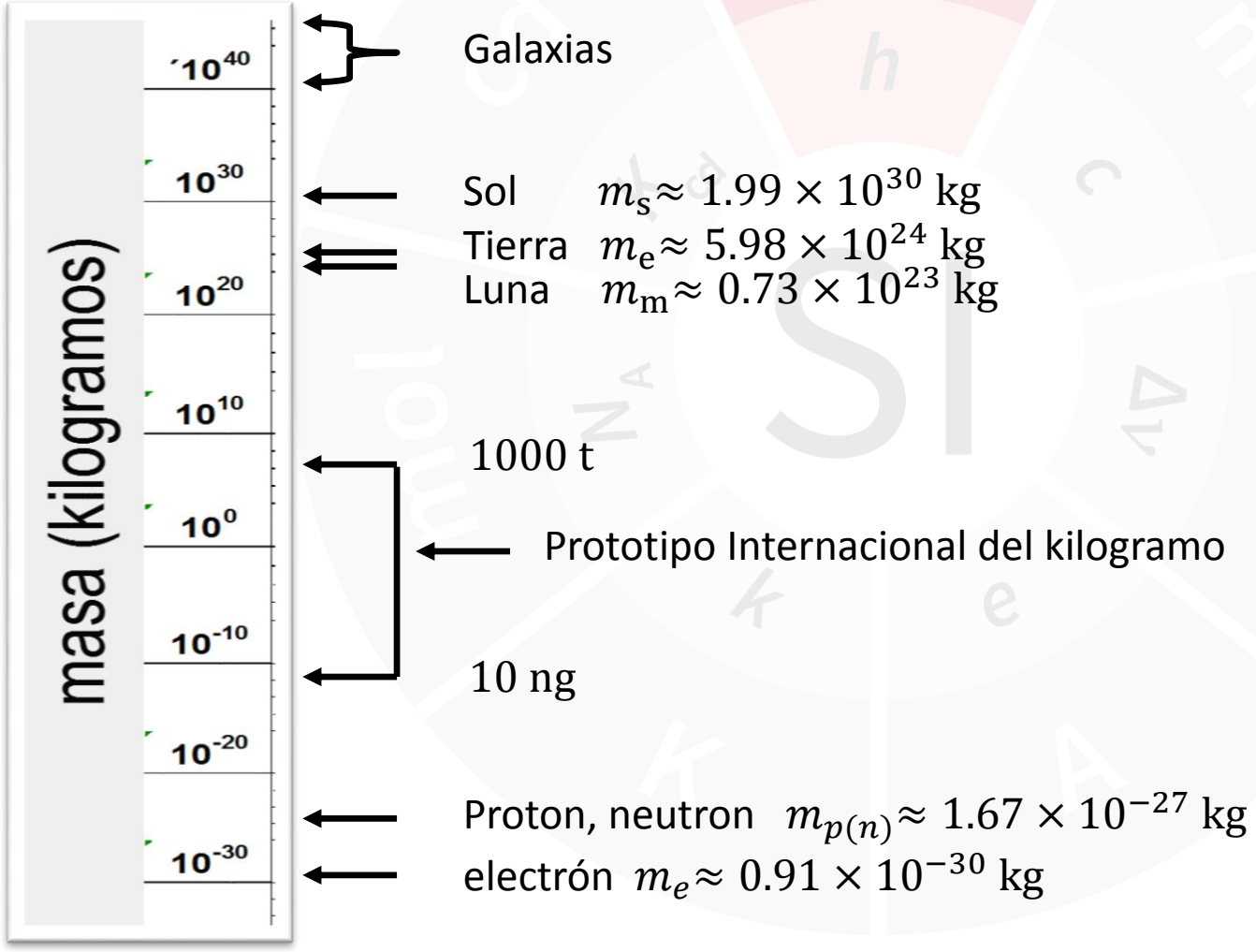

Incertidumbre estándar relativa de las pesas
de acuerdo a la OIML R111:2004
Clase E1
Clase E2
Clase F1
Clase F2
Clase M1
Clase M2
Clase M3
1.00E+00
1.00E-01
1.00E-02
1.00E-03
1.00E-04
1.00E-05
1.00E-06
1.00E-07
1.00E-08
Inc. Relativa
5 000 kg
1 000 kg
200 kg
50 kg
10 kg
2 kg
500 g
100 g
20 g
5 g
1 g
200 mg
50 mg
10 mg
2 mg
Valor Nominal

CENAM
CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA

EL CLUB DE LA BALANZA

Escala de valores en masa

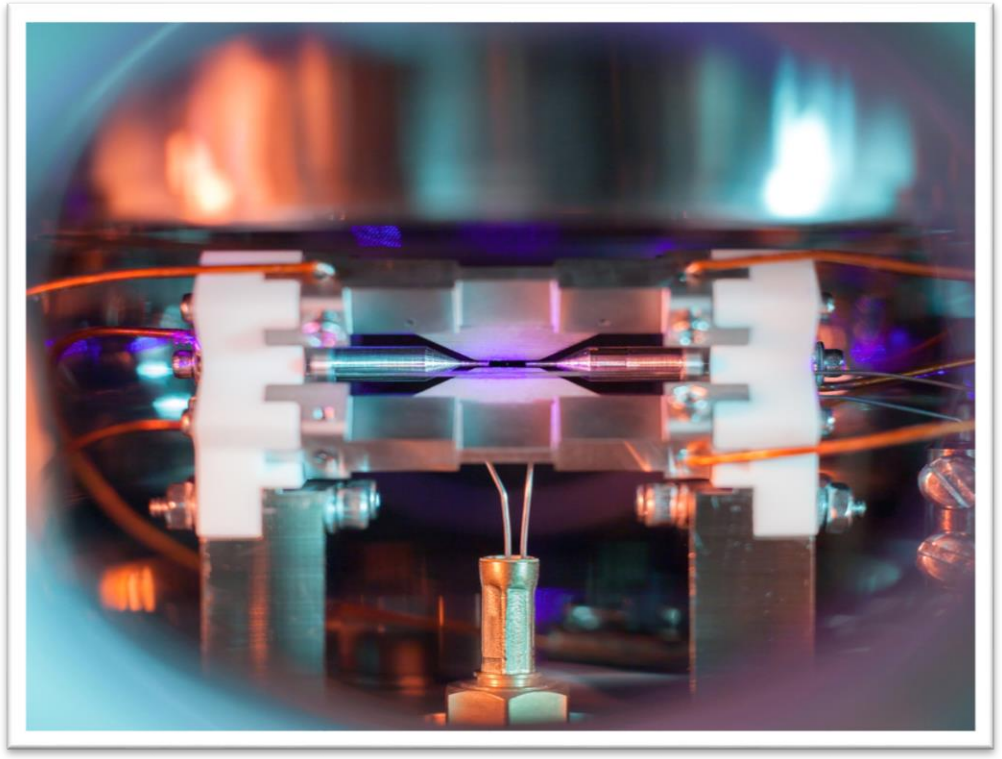
En física, química y astronomía, se tienen estimaciones y determinaciones de la masa de acuerdo con diversas técnicas de medición que cubren un intervalo muy amplio.

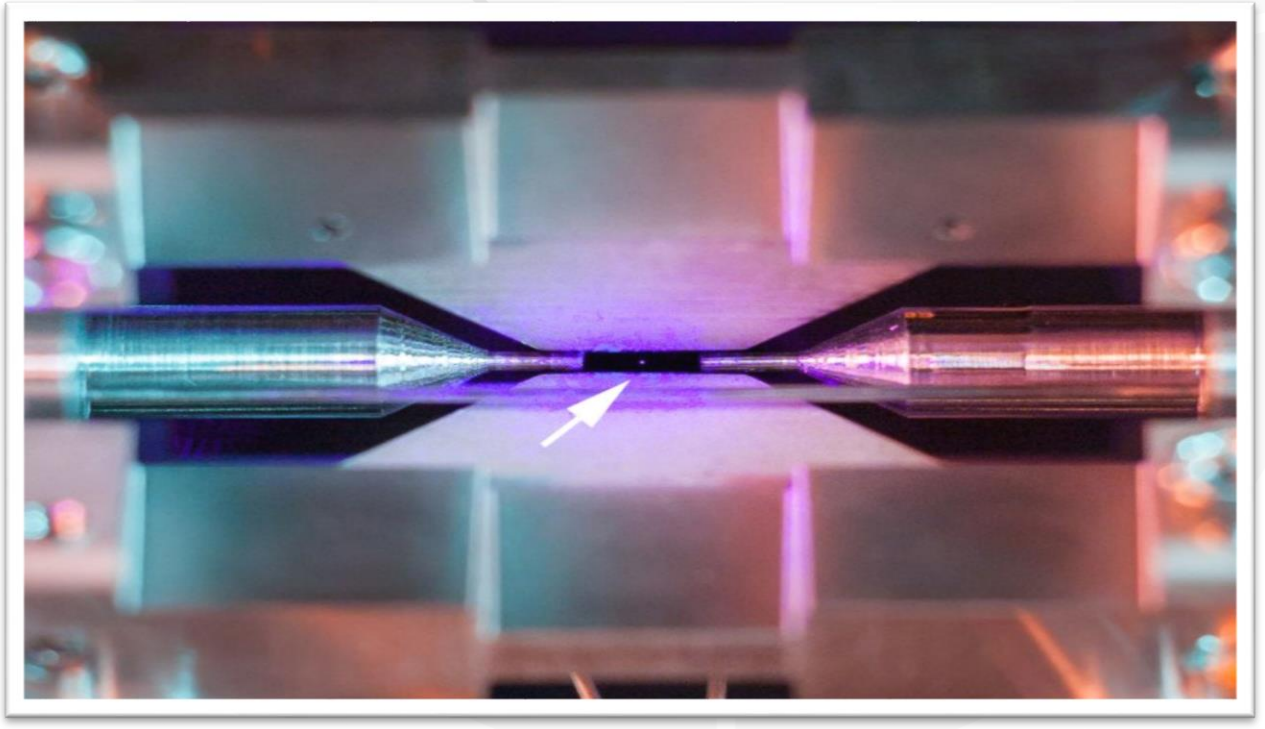


Limitaciones de la definición actual del kilogramo

- La definición del kilogramo no esta ligada a una propiedad invariante de la naturaleza.
- La masa del prototipo internacional ha presentado cambios respecto a la masa de sus copias.
- El prototipo y sus copias ganan masa con el tiempo y pierden masa cuando los lavan para utilizarlos en comparaciones.
- La definición del kilogramo no puede ser realizada independientemente del prototipo internacional.

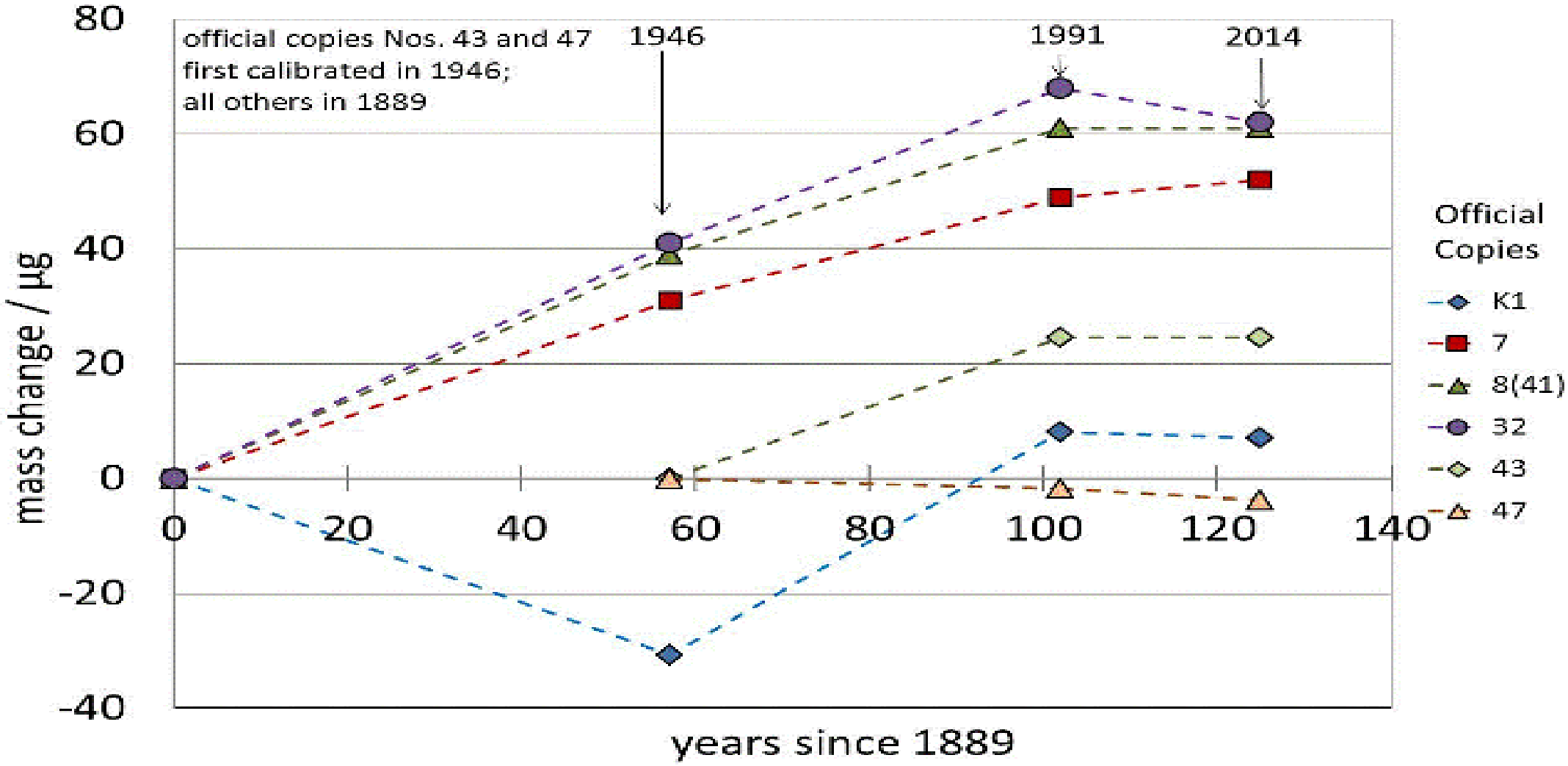
- La medición de la masa de partículas en escalas microscópicas con trazabilidad al kilogramo internacional es altamente insatisfactorio





The photo is titled “Single Atom in an Ion Trap” and was shot by David Nadlinger of the University of Oxford.

Deriva de los prototipos del kilogramo a lo largo del tiempo



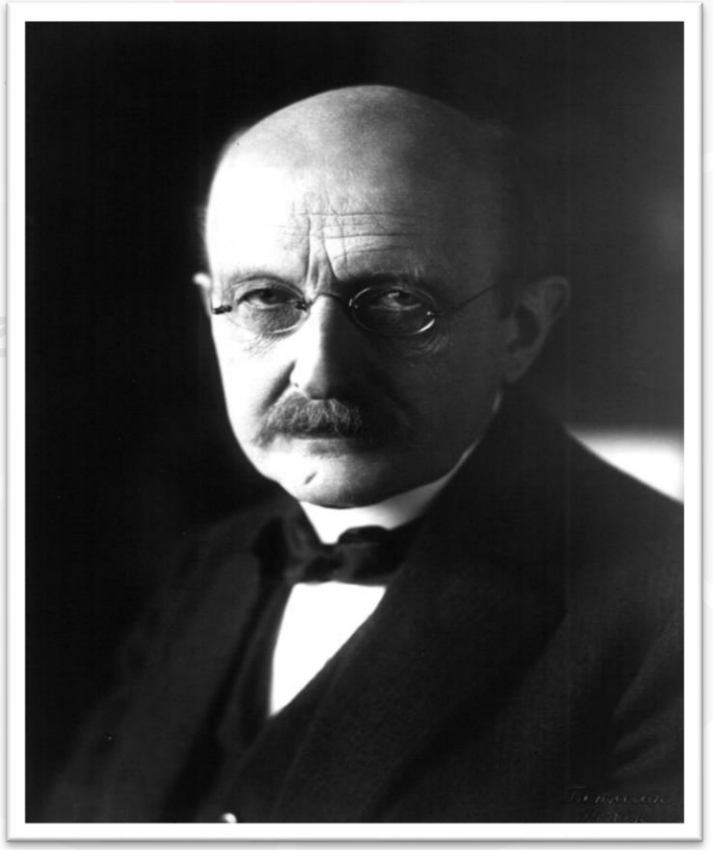
CENAM
CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA

EL CLUB DE LA BALANZA

¿Que es la masa en la física moderna?

Max Planck en 1900 propuso que la siguiente expresión para la energía de los osciladores a nivel atómico (e incluso a microescala), en la cual la energía se encuentra restringida únicamente a ciertos valores

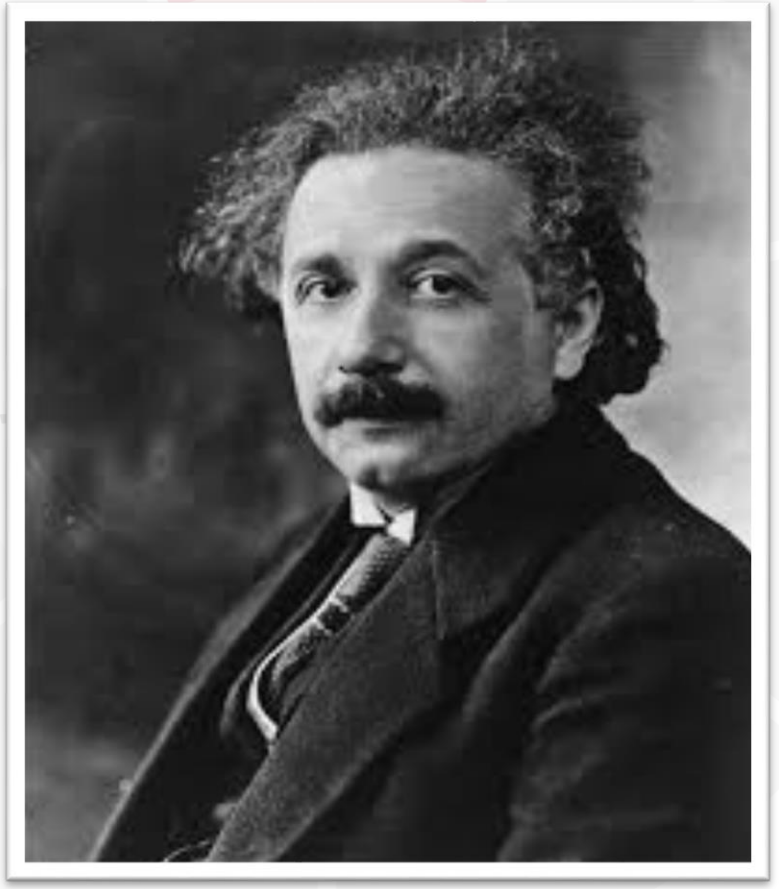
$$E = n\,h\,v$$



Max Planck

En 1905 Albert Einstein formuló su teoría de la relatividad especial en donde relaciona la masa en reposo de una partícula y su energía total

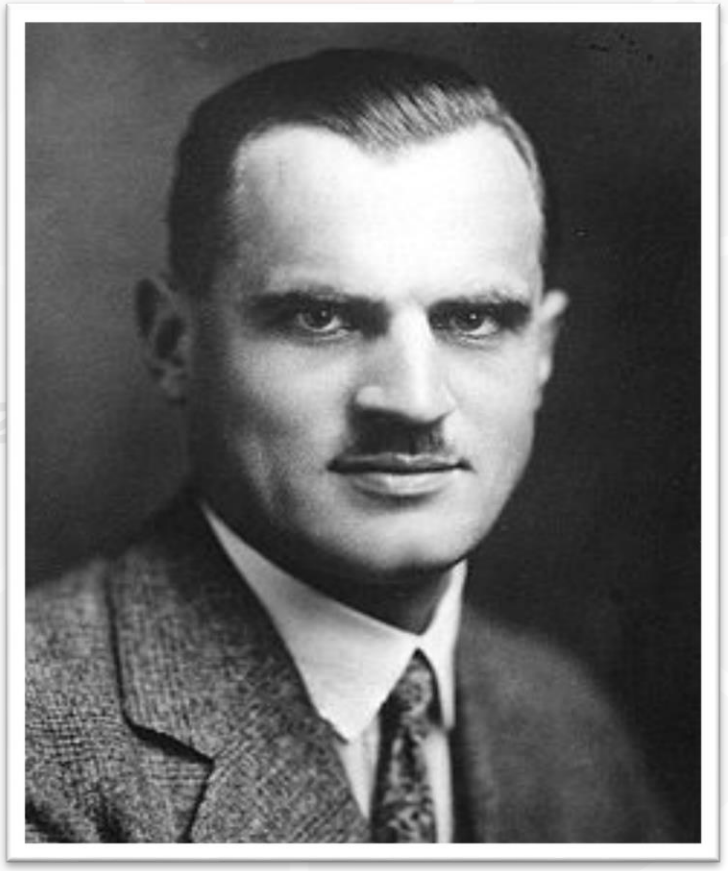
$$E = m\,c^2$$



Albert Einstein

A medida que el conocimiento de la mecánica cuántica y la relatividad ganaba impulso, se hizo evidente que en ciertos casos especiales, la partícula que tiene masa m en la expresión de la relatividad de Einstein, también podría considerarse que tiene un único quantum de energía, o $E = hv$

$$m = \frac{hv}{c^2}$$



Arthur Holly Compton

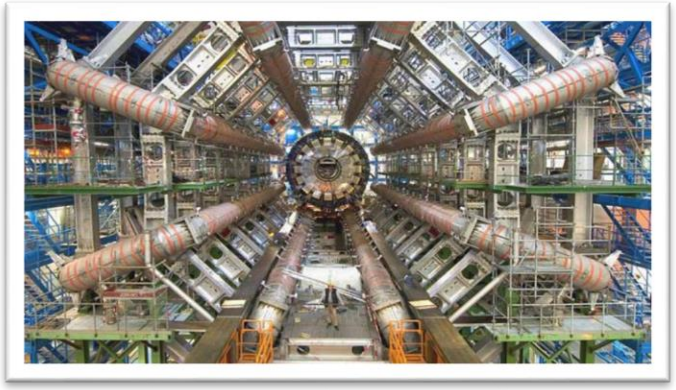
CENAM
CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA

EL CLUB DE LA BALANZA

La masa puede convertirse en energía

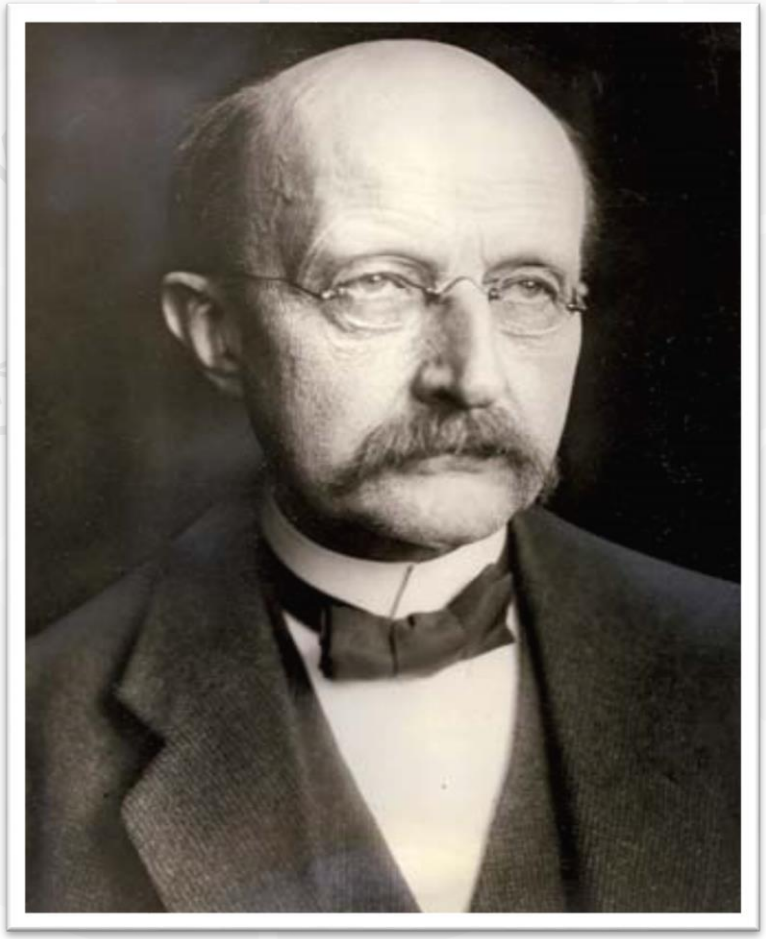
masa

energía



La energía puede convertirse en masa

El kilogramo símbolo kg, es la unidad de masa del SI. Se define al tomar como valor numérico fijo la **constante de Planck h** como 6.626 070 15 × 10^{-34} expresada en la unidad J s, la cual es igual a kg m^2 s^{-1}, donde el metro y el segundo están definidas en términos de la velocidad de la luz c y la frecuencia de transición hiperfina del átomo de cesio 133 $\Delta\nu_{Cs}$.



Max Karl Ernest Ludwig Planck
April 23, 1858 – October 4, 1947 Germany

CENAM
CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA

EL CLUB DE LA BALANZA

¿Cómo realizar un kilogramo con base en la constante de Planck?