

¿QUIÉN GANARÁ LA COMPETENCIA POR EL KILOGRAMO?

Ernst O. Göbel
Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Bundesallee 100, D-38116 Braunschweig, Alemania
Tel.: +49-531-5921000, Fax: +49-531-5921005, e-mail: Ernst.O.Goebel@ptb.de

Resumen: El kilogramo, la unidad de la masa, es la única unidad en el Sistema Internacional de Unidades (SI) que desde 1889 es representada por una medida materializada, el kilogramo internacional. Comparaciones entre los diferentes prototipos que mantienen varios Institutos Nacionales de Metrología sugieren que la masa del kilogramo internacional no es constante en el curso del tiempo. En la actualidad se encuentran en desarrollo cuatro experimentos que deben controlar la estabilidad del kilogramo internacional y que podrían servir de base para una nueva definición de la unidad de la masa.

INTRODUCCIÓN

De las siete unidades base del Sistema Internacional de Unidades (SI), introducido en 1960, la unidad de la masa, el kilogramo, es hoy la única unidad representada por una medida materializada, el kilogramo internacional. El kilogramo internacional consiste de una aleación de platino-iridio (Pt-Ir) protegido por tres campanas de vidrio (véase Fig. 1), está custodiado en una caja fuerte en el sótano de la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM) en Sèvres, cerca de París. En 1889 se fabricaron un total de 42 prototipos del kilogramo de Pt-Ir con una tolerancia máxima de ± 1 mg. 30 de esos prototipos se sortearon entre los países miembros de la Convención del Metro. Sin embargo, comparaciones entre los diferentes prototipos de estos países, así como otros duplicados del kilogramo internacional muestran que en el transcurso del tiempo los valores de masa cambian a una razón de aproximadamente $0,5 \times 10^{-9}$ kg/año (véase Fig. 2). Aunque no se puede determinar con seguridad, cuáles de los patrones de masa cambian, las mediciones sugieren que el kilogramo internacional no es estable. Para comprobar esto, es preciso elaborar métodos independientes que permitan relacionar la unidad de la masa a una constante, por ejemplo a la constante de Planck h o a la masa de un átomo o a la de una partícula elemental, con una incertidumbre relativa de medición mejor que 10^{-8} . Con este fin se están investigando en la actualidad cuatro planteamientos experimentales en diferentes institutos nacionales de metrología. A continuación se describirán estos cuatro planteamientos y se comentarán sus fases actuales de desarrollo.

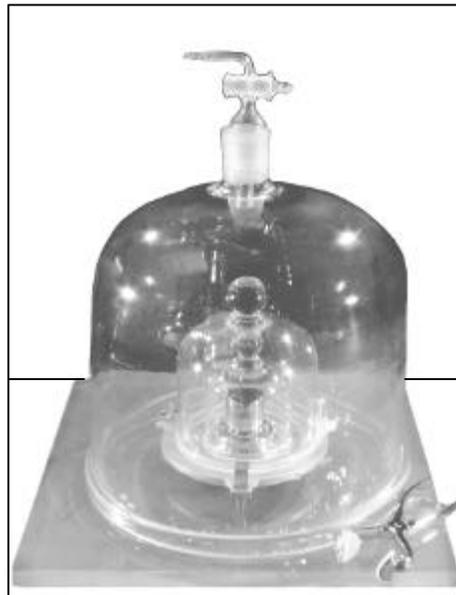


Fig. 1 El kilogramo patrón en la Oficina Internacional de Pesas y Medidas en Sèvres.

LA BALANZA DEL WATT

En el experimento de la balanza del Watt se compara el peso causado por una masa con una fuerza electromagnética (fuerza de Lorentz). Si las magnitudes eléctricas se miden mediante el efecto Josephson o el efecto Hall cuántico [1], la unidad del kilogramo queda en términos de la constante de

Planck h . Este experimento, propuesto por Bryan Kibble en 1976 [2], está siendo investigado por tres institutos, el National Physical Laboratory (NPL) en Inglaterra, el National Institute of Standards and Technology (NIST) en los EUA y el Eidgenössisches Amt für Messwesen (EAM / OFMET) de Suiza.

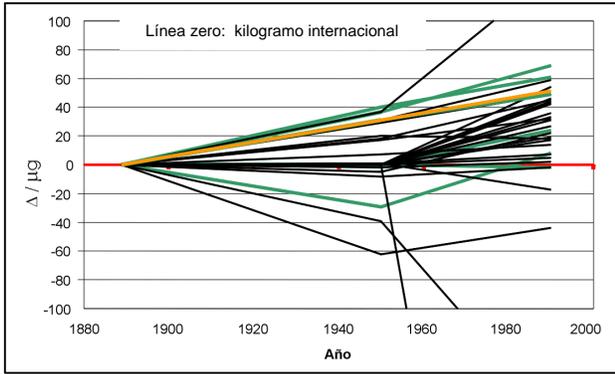


Fig. 2 Modificaciones de masa de diferentes prototipos del kilogramo en relación con el kilogramo internacional de acuerdo con las mediciones comparativas internacionales de 1950 y 1990. Los valores de los mismos prototipos son unidos por líneas para mejor identificación, causando así acodamientos en el año 1950. Probablemente estos acodamientos de los tres patrones se deben a manejo inadecuado. En 1990 se incluyeron a las mediciones comparativas otros prototipos producidos más tarde, de los que se creía que en el 1950 todavía eran idénticos con el kilogramo internacional.

El experimento consiste de dos fases (véase Fig. 3). En la primera fase (*force mode*) la fuerza atrayente entre dos bobinas por las que circula una corriente I es compensada por un peso, por lo tanto:

$$m \cdot g = -I \cdot \left(\frac{d\mathbf{f}_{12}}{dz} \right) \quad (1)$$

En la ecuación, \mathbf{f}_{12} representa el flujo magnético ocasionado por las dos bobinas. En la segunda fase (*velocity mode*) se desplaza una bobina con una velocidad constante v contra la otra bobina, por la que circula la misma corriente. Se mide la tensión inducida, para la que es válida la siguiente ecuación según la ley de inducción:

$$U = - \left(\frac{d\mathbf{f}_{12}}{dt} \right) = - \left(\frac{d\mathbf{f}_{12}}{dz} \right) \cdot \left(\frac{dz}{dt} \right) \quad (2)$$

Las ecuaciones (1) y (2) conducen a la relación

$$m \cdot g \cdot v = U \cdot I \quad (3)$$

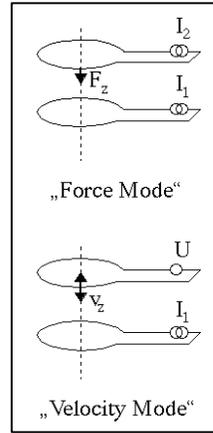


Fig. 3

El principio del experimento de la balanza de Watt que consiste de las dos fases *force-mode* y *velocity-mode*. En la primera fase se compensa la fuerza entre las bobinas por un peso, y en la segunda fase se mueve una bobina con velocidad constante contra la segunda bobina y se mide la tensión inducida.

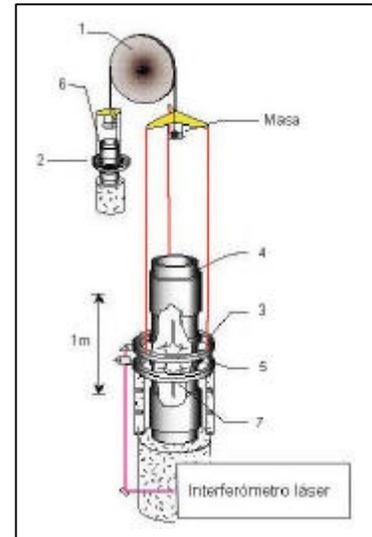


Fig. 4

Representación esquemática del experimento de la balanza de Watt en el NIST. Consiste de un eje (1), a través del cual están unidas las piezas móviles (bobina auxiliar, 2 y bobina móvil, 3), que pueden ser cargadas con patrones de masa. El imán superconductor (4) y la bobina fija (5) están unidos rigidamente con el eje y el imán adicional (6). El imán superconductor (no se ve el vaso Dewar que lo rodea) genera fuera del vaso Dewar, junto con la bobina fija, un campo magnético de simetría radial de 0,1 T (7) con un gradiente en dirección vertical. El imán adicional con la bobina móvil del lado izquierdo sirve para mover la bobina móvil del lado derecho con una velocidad constante (*velocity-mode*). El movimiento de la bobina móvil derecha es controlado por interferómetros láser en el plano horizontal y medido en dirección vertical.

Este experimento también se puede interpretar como la representación de SI del watt ($1 \text{ W} = 1 \text{ kg m}^2\text{s}^{-3}$), ya que las magnitudes que se encuentran del lado izquierdo se miden en unidades del SI. La gran ventaja de este experimento consiste en que no es necesario conocer ni las dimensiones geométricas de la bobina ni la densidad de flujo magnético y su recorrido espacial. Por otra parte el experimento representa un desafío extraordinario sobre todo para la estructura mecánica y el ajuste de las piezas movidas una contra otra, para evitar componentes de fuerza horizontales.

Si las magnitudes del lado derecho, corriente y tensión, se miden usando el efecto Josephson y el efecto Hall cuántico, quedando relacionadas con las constantes Josephson y von Klitzing, se puede modificar la ecuación (3) de la manera siguiente [3]:

$$m \cdot g \cdot v = \frac{h}{4} K_{J-90}^2 \cdot R_{K-90} \cdot U \cdot I \quad (4)$$

K_{J-90} y R_{K-90} son los valores para las constantes Josephson y von Klitzing respectivamente, determinados en 1990, para la representación del volt y el ohm, U e I están dados en estas unidades.

Como se indica en la ecuación (4), el experimento también puede ser usado para determinar la constante de Planck, siempre que g y v pueden ser determinados con una incertidumbre requerida. Esto es posible para la aceleración terrestre con gravímetros (incertidumbre estándar relativa de 10^{-9}), siendo preciso determinar g en el lugar del experimento y considerar que g varía a lo largo de un día, en un orden de 10^{-7} , dependiendo de la posición del sol y de la luna. La medición de la velocidad se lleva a cabo mediante una medición interferométrica de la distancia recorrida, cuyas posibilidades están limitadas debido a la corrección necesaria por el índice de refracción del aire. Por otra parte, el experimento puede ser usado para controlar la estabilidad del kilogramo, si se obtiene la incertidumbre requerida, ya que según los conocimientos actuales de la física, la constante fundamental h es invariable en el curso del tiempo (y en cualquier lugar). Cabe señalar que tanto para este experimento como para los dos experimentos que se describirán a continuación, el punto de partida es un proceso de pesaje sumamente exacto (con el kilogramo internacional utilizado como patrón de referencia). Relacionando la masa bajo prueba

de manera independiente a una constante fundamental, sin embargo, se puede determinar unívocamente, al repetir el proceso, si la masa de prueba o el kilogramo internacional cambiaron, y en dado caso, determinar en cuanto está cambiando. Además, este proceso garantiza que en el caso de llegar a una nueva definición del kilogramo a través de uno de estos procesos, el "viejo" y el "nuevo" kilogramo sean idénticos en ese momento dado.

La Fig. 4 es una representación esquemática de la estructura del experimento del NIST. Consiste de una bobina superconductora que genera un campo magnético de simetría radial, externamente al Dewar que contiene la bobina superconductora se encuentran una bobina fija y una bobina móvil. La bobina móvil está conectada a una balanza, que se encuentra por encima del Dewar. El movimiento de la bobina se mide con un interferómetro láser. La estructura del experimento del NIST está siendo modificada, dejando la parte central del conjunto de aparatos completamente en el vacío, con el fin de reducir la incertidumbre por la influencia del índice de refracción del aire al medir el movimiento de la bobina.

En 1998 el grupo NIST reportó la determinación de h usando el experimento descrito [3,4], con una incertidumbre relativa de $8,7 \times 10^{-8}$. Una reducción de esta incertidumbre en un orden de magnitud satisfacen los requerimientos mencionados al principio. Se esperan los primeros resultados con datos cuantitativos de la incertidumbre para este, después de concluir las modificaciones de la estructura del experimento. Para este mismo año se espera contar con más resultados del experimento de la balanza del watt llevado a cabo en el NPL así como del experimento del EAM/OFMET, cuya estructura muestra algunas diferencias en comparación con las primeras dos. Se espera que estos resultados permitan un pronóstico sobre la posibilidad de una nueva definición del kilogramo basada en los experimentos descritos anteriormente. Para ello probablemente se asignaría un valor fijo a la constante de Planck (igual que en el caso de la velocidad de la luz) y el kilogramo sería relacionado a este valor numérico conforme a la ecuación (4). Una nueva definición posible del kilogramo podría ser la siguiente:

"Un kilogramo es la masa en reposo de un cuerpo, la que al comparar la potencia mecánica y eléctrica da por resultado un valor de $6,626 \ 068 \ 91 \times 10^{-34} \text{ J s}$ para la constante de Planck h ".

Para el valor de h (que ya no tendría ninguna incertidumbre) se adoptó el valor actual de CODATA [5]. Utilizando las relaciones $E = mc^2$ y $E = h\nu$, B.

Taylor [6] propuso la alternativa siguiente:

"Un kilogramo es la masa en reposo de un cuerpo cuya energía corresponde a un conjunto de fotones, cuyas frecuencias suman $135\,639\,277 \times 10^{42}$ Hz". El factor numérico resulta en c^2/h .

EL PROYECTO DE AVOGADRO

El Proyecto de Avogadro comprende varios experimentos que tienen el objetivo de determinar la exactitud de la constante de Avogadro (anteriormente: constante de Loschmidt), N_A , a base de un monocristal de silicio [7]. Según la relación

$$1 \text{ kg} = 10^3 \{N_A\} \cdot u \quad (5)$$

donde u es la unidad de masa atómica ($u = \frac{1}{12} m(^{12}\text{C})$), es posible determinar la unidad de masa atómica u [8] o, al conocer N_A , trazar el kilogramo directamente a la unidad de masa atómica u con una incertidumbre relativa menor que 10^{-8} . Los institutos que participan en el experimento de Avogadro son el IRMM (Bélgica), el IMGC (Italia), en NRLM (Japón), el NIST (EUA), el CSIRO (Australia) y la PTB (Alemania), que formaron un grupo de trabajo del Comité Internacional de Pesa y Medidas (CIPM) encabezado por la PTB.

La constante de Avogadro N_A en base de un monocristal de silicio es el número de átomos de silicio en un mol y resulta de la relación entre la masa molar, M_{mol} y la masa media de un átomo, m_a ,

$$N_A = \frac{M_{\text{mol}}}{m_a} \quad (6)$$

En el caso de silicio con sus tres isótopos ^{28}Si , ^{29}Si y ^{30}Si , la masa molar resulta de la suma de las masas molares de los isótopos respectivos, ponderados con la abundancia relativa f_i , con la que se encuentran los isótopos en el monocristal usado en el experimento,

$$M_{\text{mol}} = \sum_i f_i M_{\text{mol}}^i \quad (7)$$

En la ecuación i representa los tres isótopos del silicio. La masa molar atómica media resulta del volumen ocupado por un átomo, V_a , multiplicado con la densidad ρ del monocristal. El volumen atómico, por otra parte, se obtiene de la relación entre el volumen de la celda unitaria de silicio, V_u , y la cantidad promedio de átomos en la celda unitaria, n . Por lo tanto se obtiene de la ecuación (6) la siguiente ecuación:

$$N_A = \frac{V_{\text{mol}}}{V_u / n} \quad (8)$$

con el volumen molar

$$V_{\text{mol}} = M_{\text{mol}} / \rho = M_{\text{mol}} \cdot \frac{V}{m}$$

V y m representan el volumen y la masa del monocristal utilizado. En una situación ideal, la cantidad promedio de los átomos en la celda unitaria es de ocho para el silicio con estructura fcc. En cristales reales, sin embargo, el número puede variar debido a lugares vacantes o posiciones intersticiales.

Además de la caracterización de los cristales de silicio en cuanto al dopaje, átomos extraños, espacios vacantes, etc., los parámetros más importantes son la red cristalina (determinada mediante interferometría de rayos X), la densidad como cociente de volumen y masa, así como la estructura y el grosor de la capa de óxido superficial. Los requerimientos en cuanto a la incertidumbre representan, en todas las mediciones, los límites del conocimiento en la actualidad. Por ejemplo, con el fin de determinar la densidad, es necesario medir la forma y el diámetro de la esfera de silicio con un margen de error de unos nanómetros. Para alcanzar este objetivo, se construyó un interferómetro de esfera especial en el PTB. Una condición para llevar a cabo este experimento, es la disponibilidad de monocristales de silicio bien caracterizados y de la más alta calidad. Aquí la calidad se refiere sobre todo a la perfección de la red cristalina, pocas impurezas, homogeneidad, especialmente respecto a la estructura y la distribución de los isótopos. Bien caracterizado significa que hay que identificar todos los factores de influencia potenciales, como por ejemplo las impurezas, sobre los mensurandos, y cuantificar el grado de influencia. La Fig. 5 representa un ejemplo para lo mencionado

anteriormente. Muestra la influencia de la concentración de átomos extraños de oxígeno y carbono así como de la estructura de los isótopos sobre la constante de la red cristalina (de la que resulta V_0) de silicio [9], determinada mediante interferometría de rayos X. La constante de la red cristalina puede ser determinada con una incertidumbre absoluta de unos 10^{-9} y una incertidumbre relativa de unos 10^{-8} en comparación con un cristal de referencia.

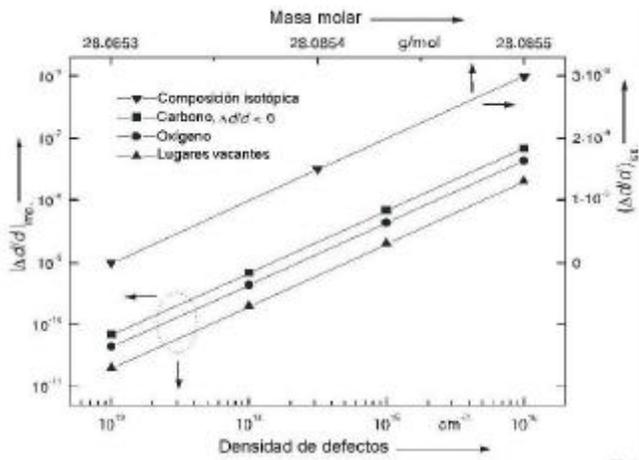


Fig. 5 Cambio relativo de la distancia de los niveles de la red de (220) en silicio con la masa molar como medida para la estructura del isótopo (escala superior y derecha), la concentración de la dotación de carbono y oxígeno así que la concentración de lagunas (escala inferior e izquierda). El cambio relativo del parámetro de la red cristalina en el caso de variaciones de la estructura de los isótopos en la región relevante asciende a aproximadamente 10^{-9} . La influencia de carbono, oxígeno y lagunas sobre el cambio relativo es considerablemente mayor en el caso de concentraciones de 10^{16} cm^{-3} .

Tomando en cuenta los factores relevantes de influencia, es posible medir la constante de la red cristalina de un monocristal de silicio perfecto e hipotético, es decir un cristal de silicio sin átomos extraños, lugares vacantes etc., con una incertidumbre relativa menor que 10^{-8} [10], lo que permitiría describir la constante de la red cristalina de silicio como constante natural.

En los experimentos llevados a cabo se usaron monocristales de fabricantes diferentes (Wacker-Siltronic, Shin-Etsu-Semiconductor, Montecatini), que tanto mediante el proceso de estirado por zona

como con el método de Czochralski fueron fabricados bajo condiciones distintas (tasa de crecimiento o velocidad de estirado, composición de la atmósfera durante el crecimiento (p. ej. H, Ar y Ar/H), sin dopaje o con dopaje tipo n, etc.). En el instituto de metrología australiano CSIRO, las piezas monocristalinas son convertidas en esferas con la forma y el acabado superficial lo más perfectos posible.

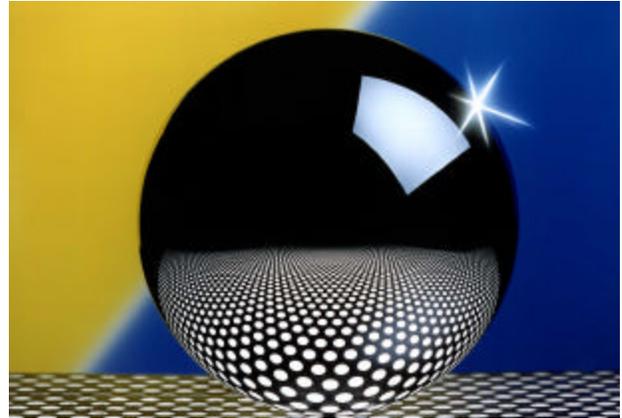


Fig. 6 Esfera de silicio monocristalino para el Proyecto de Avogadro

Las esferas tienen un diámetro de aproximadamente 10 cm y una masa de 1 kg. (véase Fig. 6). Una razón fundamental para el uso de esferas es que éstas no tienen bordes o aristas donde se podría desprender material fácilmente.

Resulta mucho más difícil la determinación de la masa molar y del volumen molar que la determinación de la constante de la red cristalina y del volumen de la celda unitaria. Por una parte se debe a la incertidumbre relativamente alta de 2×10^{-7} , con la que se puede llevar a cabo, en la actualidad, la determinación de la masa molar, es decir, la estructura de los isótopos usando métodos de espectroscopia de masas [11]. Por otra parte se obtuvieron diferencias más significativas para monocristales distintos, de las que se esperaban teniendo en cuenta la incertidumbre. Por un tiempo se dudaba de la posibilidad de una producción de monocristales de silicio reproducible de la calidad requerida. Sin embargo, mediante la ejecución de mediciones extensas y repetibles, así como mandando numerosos cristales de silicio de viaje por todo el mundo para medirlos en los laboratorios participantes, se han podido disipar estas dudas de forma considerable [12].

Esto se puede deducir de la Fig. 7, en la que las masas molares de 16 diferente monocristales de silicio aparecen en función de las densidades correspondientes ρ . Hay un solo punto de medición que difiere de la relación lineal que se obtiene en una situación ideal, así que se supone que el monocristal en cuestión tiene defectos (p. ej. Lugares vacantes o vacíos), los que sin embargo no se han podido comprobar a pesar de muchos esfuerzos. Por eso, durante su última reunión en Mayo del año 2000, el grupo internacional de trabajo tomó la decisión de ya no tomar en cuenta este valor hasta que se haya aclarado definitivamente la determinación del volumen molar de silicio [13]. Procediendo de tal manera, se obtiene

$$V_{\text{mol}}^{\text{Si}} = \frac{M_{\text{mol}}^{\text{Si}}}{\rho} = 12,058823(5) \text{ cm}^3/\text{mol}$$

lo que junto con el valor de CODATA para el parámetro de la red cristalina de silicio para la constante de Avogadro resulta en

$$N_A = 6,0221350(25) \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}.$$

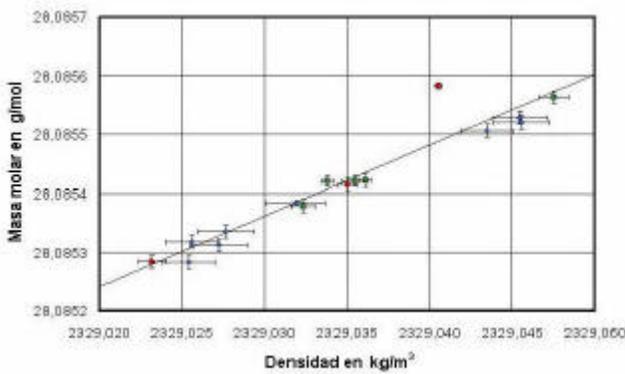


Fig. 7 Las masas molares de diferentes monocristales de silicio como función de su densidad

La desviación estándar indicada corresponde a una incertidumbre relativa de 4×10^{-7} , así que aún hay que hacer un gran esfuerzos para alcanzar la incertidumbre requerida de menos de 10^{-8} . Los resultados más recientes permiten esperar que la reproducibilidad de la fabricación y la calidad de los monocristales de silicio logren alcanzar esta meta. También se espera reducir la incertidumbre para la mayoría de los mensurandos relevantes (constante de la red cristalina, volumen, masa, acabado y composición química de la superficie de la esfera de

silicio) efectuando modificaciones considerables en los procedimientos individuales de medición. La determinación de la masa molar, sin embargo, sigue siendo la gran preocupación. Aquí la emisión instantánea de γ de silicio después de la captura de neutrones térmicos, podría constituir un método alternativo a la espectroscopia de masa [14]. En un primer intento usando este método se determinaron las diferencias atómicas de la masa de los tres isótopos de silicio con una incertidumbre menor que 3×10^{-9} . Se quiere efectuar la medición de la abundancia relativa de los isótopos y su calibración usando muestras enriquecidas con diferentes cantidades de silicio. Lo que queda es la pregunta si será posible reducir considerablemente la incertidumbre para la determinación de la masa molar. Si fuera posible, se podría asignar un valor numérico a u conforme a la ecuación (5) y la definición del kilogramo podría ser la siguiente:

“Un kilogramo es la masa en reposo de $5,018\,445\,8 \times 10^{25}$ átomos ^{12}C libres en su estado fundamental”.

El valor numérico resulta de $(N_A/12) \times 10^3$ y N_A fue sustituido por el valor indicado arriba. Por principio se podría considerar usar una esfera de monocristal de silicio como el “nuevo kilogramo internacional”, que permitiría, en contraposición al kilogramo internacional actual, contar los átomos mediante el experimento de Avogadro, si es necesario. Esto, sin embargo, no haría justicia a la intención de basar las unidades del SI en constantes fundamentales.

LEVITACIÓN MAGNÉTICA

La levitación magnética se basa en la fuerza que ejerce un campo magnético no homogéneo en el espacio sobre un cuerpo diamagnético en dirección de la densidad de flujo decreciente (véase Fig. 8). En un principio fue propuesta como una posibilidad de representar la unidad de la intensidad de corriente eléctrica, el amper [15] por científicos del entonces NBS. Más tarde el experimento se utilizó

para determinar el quantum de flujo, $f_0 = \frac{h}{2e}$ en el

instituto de metrología ruso (VNIIM) y el instituto japonés (NRLM). Actualmente el NRLM es el único instituto en emplear este método.

Si la bobina en la Fig. 8 es alimentada por una fuente de corriente, se obtiene según la ecuación de energía la siguiente ecuación:

$$I \cdot U \cdot dt = dA + dW \quad (9)$$

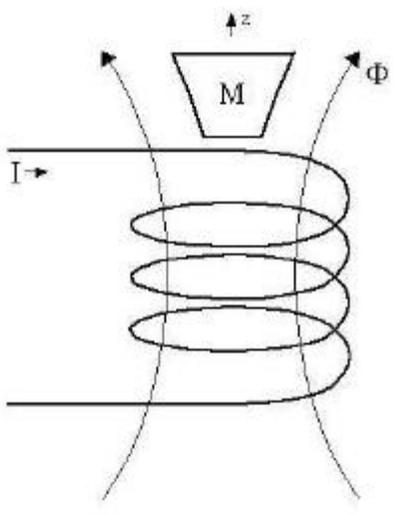


Fig. 8 Principio del experimento de la levitación magnética. Una bobina superconductora atravesada por corriente genera un campo magnético con gradientes en dirección de z , manteniendo la masa superconductora M en estado de suspensión.

Donde U es la tensión, A es el trabajo del campo magnético en el potencial de gravitación, dado por $A = m \cdot g \cdot z$, W es la energía del campo magnético, dada por $W = \frac{1}{2} L \cdot I^2$, donde L es la inductancia de la bobina. Mediante la ley de inducción se puede modificar la ecuación (9), obteniendo la ecuación siguiente:

$$I \cdot d\mathbf{f} = m \cdot g \cdot dz + L \cdot I \cdot dI \quad (10)$$

Observando dos posiciones de equilibrio del cuerpo magnético en suspensión con las alturas z_1 y z_h , entre las que el cuerpo fue movido adiabáticamente por cambios correspondientes de corriente de I_1 a I_h , se obtiene la ecuación siguiente:

$$\int_{\Phi_1}^{\Phi_h} I \cdot d\mathbf{f} = m \cdot g \cdot \int_{z_1}^{z_h} dz + L \int_{I_1}^{I_h} I \cdot dI \quad (11)$$

Por lo tanto:

$$\int_{\Phi_1}^{\Phi_h} I \cdot d\Phi = m \cdot g \cdot (z_h - z_1) + \frac{1}{2} L (I_h^2 - I_1^2) \quad (12)$$

Esta relación, sin embargo, es válida solamente si se cumplen dos condiciones 1.) no se genera calentamiento por efecto Joule en la bobina y 2.) el cuerpo magnético en suspensión es un cuerpo diamagnético ideal, es decir que no absorba energía del campo magnético. Se puede cumplir con las dos condiciones si tanto la bobina como el cuerpo en suspensión son superconductores.

Midiendo la corriente I y el flujo magnético F con ayuda de un sistema de efecto Josephson y SQUIDs (Superconducting Quantum Interference Device) [1], se puede modificar el lado izquierdo de la ecuación (12) de la manera siguiente [12]:

$$F(f, n, N) \cdot \mathbf{f}_\circ = \int_{\Phi_1}^{\Phi_h} I \cdot d\mathbf{f} \quad (13)$$

la función $F(f, n, N)$ se determina mediante un experimento y depende de la frecuencia f con la que se polariza el sistema de efecto Josephson así como de los parámetros del sistema de efecto Josephson y del SQUID.

Según las ecuaciones (12) y (13) la levitación magnética también puede ser interpretada como un procedimiento para determinar el quantum de flujo magnético, igual que la balanza del watt se puede usar para determinar la constante de Planck. Y como en el caso de la balanza del watt, la levitación magnética puede llevar a una nueva definición del kilogramo, si \mathbf{f}_\circ se puede determinar con una incertidumbre lo suficientemente baja. Entonces una nueva definición podría ser:

"Un kilogramo es la masa en reposo de un cuerpo superconductor, que en un experimento de levitación magnética para el quantum de flujo \mathbf{f}_\circ tiene un valor de $2,067\ 833\ 636 \times 10^{-15}$ Wb."

El valor numérico de \mathbf{f}_\circ corresponde al valor de CODATA [5]. Sin embargo, hasta ahora el experimento del NRLM, para el que se usó un cuerpo superconductor en suspensión de 25 g, sólo ha logrado alcanzar una incertidumbre relativa de 10^{-6} [17]. Las dificultades consisten sobre todo en estabilizar la trayectoria del cuerpo en suspensión (no deben existir componentes de fuerza horizontales), en determinar con exactitud el movimiento vertical del cuerpo en suspensión, que al igual que la bobina, se encuentra en helio líquido, y en determinar exactamente la masa del cuerpo en suspensión en el contenedor de helio.

EL EXPERIMENTO DE LA ACUMULACIÓN DE IONES DE ORO

El objetivo del experimento propuesto por M. Gläser [18] es acumular en un separador de masas una masa ponderable de un haz de iones de oro y determinar el número de los átomos de oro acumulados midiendo e integrando la corriente iónica en el curso del tiempo. La masa de los átomos de oro acumulados se deriva de la ecuación siguiente:

$$m = \frac{m_{\text{Au}}}{e} \int_0^{t_m} I(t) dt \quad (14)$$

(e = carga elemental, m_{Au} = masa atómica de oro). Midiendo la corriente mediante el efecto Josephson y el efecto Hall cuántico, la ecuación (14) se puede modificar de la manera siguiente:

$$m = \frac{1}{2} n_1 \cdot n_2 \cdot m_{\text{Au}} \int_0^{t_m} f \cdot dt \quad (15)$$

En la ecuación, n_1 representa el número de la meseta en el efecto Hall cuántico, n_2 es el número de nivel de Shapiro y f la frecuencia utilizada en el sistema de efecto Josephson.

El experimento también se puede considerar para llevar a cabo una medición absoluta de la masa de un átomo de oro en unidades del kilogramo y por lo tanto como procedimiento para determinar la unidad de masa atómica u mediante la sola medición del tiempo y de la frecuencia según la relación $m_{\text{Au}} = A_r^{\text{Au}} \cdot u$ (A_r^{Au} = masa atómica relativa de oro [19]). Si eso fuera posible con la incertidumbre de medición requerida, una nueva definición del kilogramo podría ser la siguiente:

"Un kilogramo es la masa de $3,057\ 443\ 935 \times 10^{24}$ átomos de ^{197}Au ".

El valor numérico se obtiene según $n = (A_r^{\text{Au}} \{u\})^{-1}$, donde A_r^{Au} es el valor obtenido de la referencia [20] y para el valor de u se utiliza el valor reportado en CODATA [5].

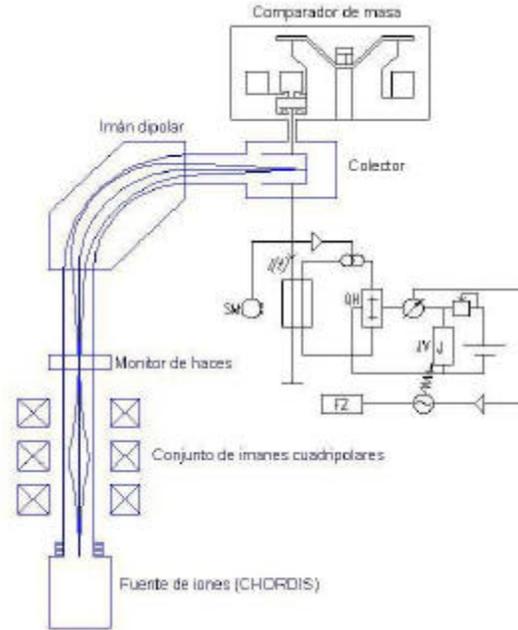


Fig. 9 Representación esquemática del experimento de acumulación de iones de oro. La parte inferior derecha muestra la electrónica de medición basada en el efecto de Josephson y el efecto Hall cuántico.

La Fig. 9 es una representación esquemática del experimento. Como se indicó anteriormente, se trata de un espectrómetro de masa modificado compuesto de una fuente iónica, lentes cuadrupolares magnéticas, un separador de masa y un colector conectado a una balanza. La electrónica de medición está integrada por un comparador de corriente criogénico, así como un sistema de efecto Hall cuántico y un sistema de efecto Josephson. Existen muchas razones para el uso de oro: por ejemplo, tiene solamente un isótopo estable, ^{197}Au ; la relación entre la masa y la carga es ventajosa debido a la alta masa atómica y es químicamente inerte. Sin embargo, el experimento también se podría llevar a cabo usando iones diferentes. Las mayores dificultades consisten en acumular en lapsos de tiempo razonables una masa ponderable con una incertidumbre relativa de 10^{-8} . Esto sería posible con una masa de 10 g, y con una corriente de ionización de 10 mA y átomos de oro de ionización simple, el tiempo de acumulación sería

de seis días. Sin embargo, una corriente iónica de 10 mA excede considerablemente la capacidad de espectrómetros de masa convencionales, y por lo tanto requeriría construcciones complicadas de aparatos técnicos. Además, las consecuencias de las altas energías de haces iónicas (unos 10^4 eV) dan como resultado efectos significativos de desprendimiento de átomos por bombardeo iónico en el colector. Por eso es necesario reducir la velocidad de los iones y trasladar el ensanchamiento correspondiente de la haz al colector. A pesar de estas y otras dificultades aparentemente insuperables, en 1999 se logró determinar por primera vez la masa atómica de oro de esta manera, si bien con una incertidumbre relativa de aproximadamente 10^{-2} (véase Fig. 10) [21].

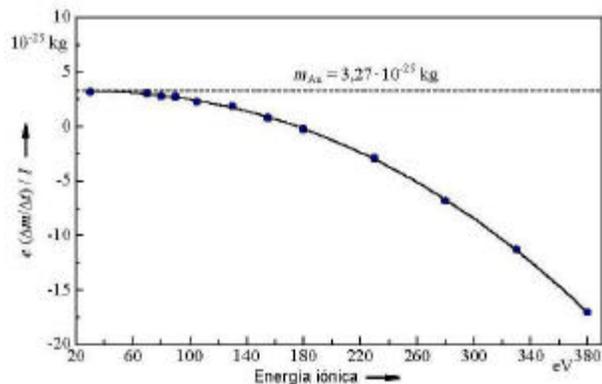


Fig. 10 La masa de partículas acumuladas en el colector como función de la energía iónica, según la ecuación (14). En el caso de energías de iones muy bajas, los efectos de desprendimiento de átomos por bombardeo iónico deberían ser despreciables, obteniendo como masa la masa atómica de oro en unidades del kilogramo.

CONCLUSIÓN

Considerando todos los planteamientos descritos, ¿quién ganará la competencia por el kilogramo? En cuanto a la incertidumbre relativa alcanzada, la balanza del watt del NIST con una incertidumbre de $8,7 \times 10^{-8}$ lleva ventaja, y se espera que las modificaciones que se están llevando a cabo en el conjunto de aparatos en el vacío contribuya a seguir reduciendo la incertidumbre. Los resultados más recientes de la balanza del watt del NPL, sin embargo, no coinciden con los resultados obtenidos por el NIST, sino que divergen considerablemente

unos de los otros fuera de las desviaciones estándar indicadas. No obstante, en el experimento del NPL se produjeron en el pasado variaciones bruscas en los valores medidos, que podrían indicar dificultades sistemáticas. Teniendo en cuenta esta situación, se están esperando ansiosamente los primeros resultado del experimento de la balanza del watt llevado a cabo por el instituto suizo METAS.

El Proyecto de Avogadro ha logrado una incertidumbre de 4×10^{-7} . Una reducción significativa sólo se puede alcanzar cuando sea posible determinar la masa molar con una incertidumbre más baja. Comparando el valor de la constante de Avogadro que resulta con base al valor del NIST para la constante de Planck [22] (véase CODATA), con el valor obtenido del experimento del monocristal de silicio, se comprueba que los valores divergen en un 10^{-6} , es decir, claramente fuera de las incertidumbres indicadas [23]. Esto representa un problema fundamental sin resolver hasta la fecha; un problema que impide llegar a una nueva definición del kilogramo usando este método. Las causas de estas disparidades pueden ser muy distintas, por ejemplo errores sistemáticos no conocidos en los experimentos correspondientes. En el caso del experimento con monocristales de silicio, por ejemplo, se podría tratar de defectos en el cristal. Esto, sin embargo, significaría que con el fin de hacer coincidir el valor del monocristal de silicio con el valor del experimento con la balanza de Watt, la densidad de todos los monocristales de silicio es demasiado alta (!) comparada con la densidad del cristal perfecto. Es teóricamente posible en el caso de silicio intersticial, pero aparte de que no existe ningún factor que lo indica, es poco probable considerando teorías fundamentales de la termodinámica. Inconsistencias no conocidos en las relaciones entre las constantes naturales podrían representar otra causa.

Debido a su incertidumbre actual, el experimento de la "levitación magnética" ocupa el último lugar después de los primeros dos experimentos. Tras terminar las modificaciones del experimento se espera lograr una incertidumbre de 10^{-7} , la cual aún no satisfaría los requerimientos por un orden de magnitud. Desde el punto de vista actual, parece muy difícil cumplir estos requisitos.

El experimento de la acumulación de iones de oro es muy reciente, y a pesar de que ya se comprobó en experimentos el planteamiento que sirve de base, sólo se va a saber en unos años más, si se puede alcanzar la meta final.

El experimento de la acumulación de los iones de oro y el Proyecto de Avogadro se distinguen de los otros dos experimentos sobre todo en el hecho de que al llegar a una nueva definición del kilogramo por medio de uno de los dos métodos, el kilogramo como unidad de la masa mantendría su identidad en el SI, es decir que igual que antes se trazaría a una "masa patrón". Sin embargo, en vez del kilogramo internacional, sería la masa de un átomo de oro o silicio o la unidad de masa atómica u . En el caso de los otros dos planteamientos, el kilogramo sería ligado a unidades eléctricas. Teniendo en cuenta la importancia de la masa en la física, esto es difícil de imaginar o al menos una cuestión de costumbres. Sin embargo, al final la incertidumbre alcanzable y la reproducibilidad de los diferentes planteamientos serán los elementos decisivos.

Así que la competencia por el kilogramo sigue abierta, y más interesante que nunca.

AGRADECIMIENTOS

Estoy muy agradecido a mis compañeros E. Braun, P. Becker, M. Gläser y M. Kochsiek por sus comentarios valiosos.

NOTA

El presente documento es una traducción del artículo: "Wer gewinnt den Wettlauf um das Kilogramm?", Ernst O. Göbel, *Physikalische Blätter* 57, 35-41 (2001)

REFERENCIAS

- [1] E. Göbel, *Phys. Bl.* 53, 217 (1997)
- [2] B. Kibble en „Atomic Masses and Fundamental Constants“ (J. H. Sanders, A. H. Wapstra, Eds.), vol. 5, pp 545-551, Plenum, N.Y. 1976
- [3] E. Williams et al., *Phys. Rev. Lett.* 81, 2404 (1998)
- [4] E. Braun, *Phys. Blätter* 54, 998 (1998)
- [5] P.J. Mohr, B.N. Taylor, *J. Phys. Chem. Ref. Data* 28, 1713 (1999)
- [6] B.N. Taylor, P.J. Mohr, *Metrología* 36, 63 (1999)
- [7] P. Becker, The precise determination of Loschmidt's number (Avogadro constant) as a step towards a redefinition of the SI unit of mass, en: *Pioniering Ideas for the Physical and Chemical Sciences*, ed. by W. Fleischhacker and T. Schönfeld, Plenum Publishing Corp. New York 1997
- [8] La incertidumbre relativa de $u = 1,66053873(13) \times 10^{-27}$ Kg asciende a $7,9 \times 10^{-8}$ (s. [5])
- [9] D. Windisch, P. Becker, *Phil. Mag. A* 58, 435, (1988) y *phys. stat. sol. (a)* 118, 379, (1990)
- [10] J. Martin, et al., *Metrología* 35, 811, (1998)
- [11] P. de Bièvre et al., *Metrología* 32, 103, (1995)
- [12] P. de Bièvre et al., presentado en *IEEE Trans. Instrum. Meas.* (2000)
- [13] P. Becker, presentado en *Metrología* (2000)

- [14] S. Röttger, A. Paul, U. Keyser, Prompt (n,γ) spectrometry for accurate determination of atomic mass differences, en: Intern. Workshop on Research with Fission Fragments, ed. by T. von Egidy et al., World Scientific Singapore, 1997, pp. 258 - 263
- [15] D. B. Sullivan, N. V. Frederick, IEEE Mag. 13, 396 (1977)
- [16] F. Shiota et al., Jap. Journ. Appl. Phys. 22, 1439 (1983)
- [17] Y. Fujii et al., IEEE Trans. Instr. Meas., 48, 200 (1999)
- [18] M. Gläser, Rev. Sci. Instrum. 62, 2493 (1991)
- [19] Es posible determinar la masa atómica relativa mediante un atrapaiones con una incertidumbre menor que 10^{-8} , véase p. Ej.: F. DiFilippo et al., Phys. Rev. Lett. 73, 1481 (1994); según la "atomic mass table" de 1993, la incertidumbre relativa actual de A_r^{Au} asciende a $1,5 \times 10^{-8}$.
- [20] G. Audi, A.H. Wapstra, Nucl. Phys. A565, 1 (1993)
- [21] D. Ratschko et al., será publicado
- [22] N_A se deriva de h según
- $$N_A = \frac{c \cdot M_p \alpha^2}{2R_\infty \left(\frac{m_p}{m_e} \right) \cdot h}$$
- (c = velocidad de la luz en el vacío, M_p = masa molar del protón, α = constante de estructura fina, R_∞ = constante de Rydberg, m_p , m_e = masa del protón y del electrón).
- [23] El valor de la constante de Avogadro que resulta de las mediciones con la balanza de Watt del NPL, coincide un $1,5 \times 10^{-7}$ con el valor obtenido en el experimento de Avogadro.