



# Contribuciones Técnicas

## SOBRE LA PROPUESTA DE UNA NUEVA DEFINICION DEL METRO

Marko Garavaglia

Centro de Investigaciones Opticas (CONICET-UNLP-CIC)  
C.C. 124, 1900 La Plata, Argentina

### Resumen:

Una vez revisados los antecedentes sobre las sugerencias para definir el metro según la longitud de onda de alguna radiación, los que se remontan a la propuesta que Babinet formuló en 1827, se pasa a analizar la sucesión de trabajos y de resultados que permitió concluir en la necesidad de cambiar la definición de 1960 basada en la radiación anaranjada del criptón 86.

Se describen los fundamentos y algunos detalles que han llevado al Comité Consultivo para la Definición del Metro a proponer una nueva definición basada en la constancia de la velocidad de la luz, así como las formas experimentales con que podrá implementársela en los laboratorios metroológicos.

### 1. INTRODUCCION

La Undécima Conferencia General de Pesas y Medidas reunida en octubre de 1960 aprobó por la Resolución NO 6 una nueva definición del metro. En sus considerandos se señalaba que el Prototipo Internacional no definía el metro con la precisión suficiente, de acuerdo con los requerimientos de la metrología y que, además, era deseable adoptar un patrón natural e indestructible en su reemplazo. Por ello, y basándose en los resultados obtenidos en las mejores determinaciones interferométricas logradas hasta esa fecha, la Conferencia decidió aprobar la siguiente definición:

"El metro es la longitud igual a 1 650 763,73 longitudes de onda en el vacío de la radiación correspondiente a la transición entre los niveles  $2p_{10}$  y  $5d_5$  del átomo de criptón 86"

Además, resolvió derogar la definición del metro que estaba en vigencia desde 1889 y que se basaba en el Prototipo Internacional de platino iridiado. No obstante, resolvió también que el Prototipo Internacional se lo siguiera conservando en las mismas condiciones que había estado desde 1889.

El valor de la longitud de onda en el vacío correspondiente a la transición entre los niveles  $2p_{10}$  y  $5d_5$  del átomo de criptón 86, es:

$$\lambda = 605\,780\,210,2 \text{ fm,}$$

con una incerteza relativa o desvío medio aceptado de

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \pm 4 \times 10^{-9}.$$

Con referencia a las mediciones interferométricas que fueron la base de la definición, cabe señalar que no sólo se trataba con ellas de determinar los valores más precisos de longitudes de onda, sino también los anchos de línea espectral de las transiciones seleccionadas. En efecto, en los años previos a la resolución sobre la nueva definición del metro se sucedieron los trabajos de investigación espectroscópica para identificar la transición atómica en la que la determinación de su longitud de onda fuera lograda con mayor precisión, teniendo, al mismo tiempo, el menor ancho de línea posible. Así, la discusión quedó planteada entre las tres radiaciones propuestas siguientes: la roja del cadmio 114 en 644 nm, la verde del mercurio 198 en 546 nm y la anaranjada del criptón 86 (o criptón 84) en 606 nm. Hasta que, por último, la decisión final fue tomada en

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1. Posibles modos de materializar el metro hacia 1962

A partir de 1962 el Comité Consultivo para la Definición del Metro comenzó a analizar los resultados obtenidos en todo el mundo por las investigaciones realizadas en temas tan variados como los filtros de radiación por efecto Zeeman, el efecto de absorción en líneas espectrales de moléculas y los láseres.

Ese mismo año de 1962 el Comité Consultivo invitó al por entonces ya famoso espectroscopista interferencial Pierre Connes a debatir sobre las posibilidades futuras de utilizar el láser como fuente de luz en metrología. Durante su exposición Connes reconoció la importancia que desempeñaría en metrología la gran coherencia de la radiación del láser, aunque, no obstante, puntualizó la seria dificultad que seguramente se presentaría debido a la falta de estabilidad del valor de la longitud de onda emitida. Prevé que dicha estabilidad se la deberá otorgar al láser algún otro dispositivo natural, el cual será en definitiva el patrón de longitudes.

Al término de su exposición, Connes vaticinó que la interconexión que el láser permitirá establecer entre las mediciones de longitud y las mediciones de frecuencia será muy fructífera [7].

Los resultados de las investigaciones le dieron la razón a Connes. En efecto, ningún dispositivo mecánico o electrónico llegó a estabilizar el valor de la longitud de onda emitida por los láseres gaseosos —los más estables de entre los diferentes tipos existentes— en un grado tal que pudiera considerárseles como serios competidores de la lámpara de criptón 86. Si bien es cierto que en lapsos muy cortos —no más de unos pocos segundos— la exactitud de las mediciones de longitud de onda de algunos láseres gaseosos resulta ser hasta cuatro órdenes de magnitud mejor que la obtenida con la lámpara de criptón 86, no puede afirmarse lo mismo para períodos largos, apropiados para los trabajos metroológicos y menos aún para una eventual definición del metro patrón.

Fue necesario esperar hasta 1969 en que comenzaron a dar frutos los trabajos relativos a la interacción de la radiación del láser de He-Ne emitida en  $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$  y una línea de absorción de la molécula de metano en la cercanía de dicha longitud de onda, para verificar la sugerencia de Connes en el sentido que una nueva definición del metro patrón estaría ciertamente basada en el empleo de radiación láser pero controlada por un fenómeno natural [8].

### 2.2. La absorción saturada y la depresión inversa de Lamb

En este dispositivo la radiación de frecuencia  $\nu_L$  emitida por el láser de He-Ne correspondiente a la longitud de onda  $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$  interactúa con la transición P(7) de la banda vibro-rotacional  $\nu_3$  del  $\text{CH}_4$ . En la figura 2a) se muestra el esquema del experimento con el tubo del láser de He-Ne y la celda de absorción de  $\text{CH}_4$ . Al propagarse en una dirección la radia-

ción de frecuencia  $\nu_L'$  emitida por el láser puede ser absorbida por aquellas moléculas animadas por una cierta componente de velocidad a lo largo del eje, de modo que por el efecto Doppler-Fizeau aparentan tener una frecuencia de absorción  $\nu_a'$ . Como la radiación del láser se propaga en ambas direcciones dentro de la cavidad, cuando la radiación de  $\nu_L'$  retorne luego de reflejarse en uno de los espejos que conforman la cavidad resonante será absorbida por aquellas otras moléculas animadas por una cierta componente de velocidad a lo largo del eje opuesta al caso anterior y que aparentan tener una frecuencia de absorción  $\nu_a''$ . Luego, la potencia del haz del láser a la frecuencia  $\nu_L'$  es absorbida por dos clases de moléculas que poseen componentes opuestas de velocidades, como se muestra en la figura 2b).

En el caso de que la radiación del láser sea absorbida por moléculas en reposo o por aquellas animadas de movimientos transversales a la dirección de propagación de la luz, resultará que  $\nu_a' = \nu_a'' = \nu_L$ , con lo que la potencia del láser en la frecuencia  $\nu_L$  dentro de la cavidad será más fuertemente absorbida que en las otras frecuencias  $\nu_L'$ . Si la potencia del láser se incrementa, se alcanzará un valor a partir del cual la absorción de radiación se saturará, esto es, las moléculas ya no podrán absorber más radiación. Este fenómeno de absorción saturada ocurrirá primero a la frecuencia  $\nu_L$ . En tales condiciones, un incremento de la potencia del láser se traducirá en una aparente disminución de la absorción de la frecuencia  $\nu_L$ , mientras que a las demás frecuencias laterales todavía seguirá produciéndose absorción. En definitiva, el proceso completo revelará la aparición de un pequeño pico en la curva de la ganancia del láser, denominado depresión inversa de Lamb (inverse Lamb dip) [9].

En la figura 2c) se grafican los modos resonantes longitudinales del láser de He-Ne excitados bajo el perfil espontáneo de la transición electrónica  $3s_2 \rightarrow 3p_4$  del Ne. La posición de los modos a lo largo del eje de las frecuencias  $\nu$  puede variarse lentamente modificando con uno de los montajes piezoeléctricos la longitud de la cavidad resonante. De ese modo, es posible llevar a coincidir la frecuencia central de un modo resonante con alguna línea espectral de absorción del metano. Una vez establecida la sintonía entre la cavidad y la línea espectral de absorción elegida y producido el efecto de absorción saturada en ella, parte de la potencia de emisión del láser de He-Ne se canaliza a través de la frecuencia del pico de depresión inversa de Lamb del  $\text{CH}_4$ , a pesar de que apenas sobresale menos del 1% sobre el resto. El otro montaje piezoeléctrico sirve para controlar cualquier anomalía en la potencia emitida por el dispositivo a través de un circuito electrónico de retroalimentación. Dicho lazo de control entre la detección de la radiación láser y la cerámica piezoeléctrica en que está montado uno de los espejos de la cavidad, asegura una emisión de potencia constante centrada en la depresión inversa de Lamb, como se muestra en la figura 2d), lo más cerca posible del máximo de la curva del modo resonante.

El ancho del modo longitudinal de resonancia para un láser de He-Ne de 30 cm de cavidad que opera a

temperatura ambiente es del orden de los 400 MHz y ocupa prácticamente todo el perfil de la línea espontánea del Ne. En tal caso, la celda absorbente del CH<sub>4</sub> genera una depresión inversa de un ancho que puede variar entre 100 y 400 kHz. Refrigerando la celda de metano a 77 K, dicho ancho fue reducido a 6 kHz [10].

Cuando se llega a estos valores del ancho de línea emitido por el dispositivo, deben tenerse presente varios tipos de efectos que controlados convenientemente aseguran su reducción y una extraordinaria estabilidad. Los más importantes de enumerar son: la sintonización de la depresión de Lamb en alguna de las componentes hiperfinas de la línea espectral de absorción del metano, ya que ellas poseen diferente grado de saturación; el empleo de celdas de metano a muy baja presión, del orden de 1 Pa (unos pocos  $\mu\text{m Hg}$ ); la expansión del haz del láser dentro de la cavidad resonante hasta diámetros de 14 cm para asegurar que atraviesen la celda de metano ondas planas libres de difracción y así eliminar totalmente el efecto Doppler-Fizeau; la aplicación de un voltaje de modulación de 10 kHz a las cerámicas piezoeléctricas de los montajes de los espejos seguida por la detección de la sintonía entre la frecuencia emitida por el láser dentro de la cavidad y el pico de la ganancia generado por la depresión de Lamb empleando técnicas electrónicas adecuadas; la eliminación de vibraciones mecánicas, de deficiencias electrónicas y de reflexiones espurias del haz del láser que se propaga dentro de la cavidad provocadas por la inserción de numerosas piezas ópticas en su interior. Con todo ello bajo control, ha sido posible obtener la emisión del láser de He-Ne estabilizado por metano, de modo que su frecuencia se mantuviera dentro de los 10 Hz, lo que corresponde a una exactitud de tres partes en  $10^{14}$ . Además, ha sido posible obtener diferencias de frecuencias entre láseres estabilizados independientemente menores a 1 kHz [10].

### 2.3. Medición de frecuencias en el rango óptico

El láser de He-Ne estabilizado con la celda de metano irradia una frecuencia del orden de los 88,4 THz, es decir  $88,4 \times 10^{12}$  Hz. A tales frecuencias no existían antes de 1965 detectores que pudieran seguir las variaciones de amplitud del campo electromagnético. Sin embargo, los proyectos iniciados en el Massachusetts Institute of Technology y en la sede de Boulder del National Bureau of Standards, ambos de los Estados Unidos de América, permitieron obtener resultados positivos con el empleo de los clásicos diodos a "bigote", como los usados en los primeros años de la era de las transmisiones radiales en los que se empleaba la galena. Los nuevos detectores del tipo metal-aislante-metal, están constituidos por un delgado hilo de tungsteno de unos pocos micrometros de diámetro cuyo extremo hace contacto con una placa pulida de níquel [11]. La juntura así constituida presenta características eléctricas no lineales. Sobre ella se enfocan los haces de los láseres cuyas frecuencias se desean comparar y se comprobó que el dispositivo es capaz de resolver señales electromagnéticas separadas en sólo  $3 \times 10^{-14}$  s.

De este modo fue posible construir cadenas de comparación entre las frecuencias de diversos láseres que emiten en el rango de 1 a 100 THz, batiendo sus armónicas generadas en el diodo a "bigote" y mezclándolas con señales generadas por circuitos electrónicos a Klystron, hasta alcanzar la región de operación del oscilador de cesio 133 —con el que se define el segundo con una incerteza de  $\pm 1 \times 10^{-14}$ — en la frecuencia de 9,2 GHz [12]. En la figura 3 se describe una de las cadenas de comparación compuesta por un Klystron ( $\nu = 74$  GHz), un láser gaseoso de HCN de 8 m. de longitud ( $\lambda = 337 \mu\text{m}$ ,  $\nu = 890$  GHz), un láser de vapor de agua de 8 m de longitud ( $\lambda = 78 \mu\text{m}$ ,  $\nu = 3,8$  THz y  $\lambda = 28 \mu\text{m}$ ,  $\nu = 10,72$  THz) y un láser de CO<sub>2</sub> ( $\lambda = 9,3 \mu\text{m}$ ,  $\nu = 32,13$  THz y  $\lambda = 10,2 \mu\text{m}$ ,  $\nu = 29,44$  THz) para unir el reloj de cesio 133 y el láser de He-Ne estabilizado con la celda de metano. De estas mediciones se obtuvo el siguiente valor de la frecuencia de la línea de absorción del metano correspondiente a la componente F<sub>2</sub> [2] de la transición P(7) de la banda vibro-rotacional  $\nu_3$ :

$$\nu_{\text{CH}_4} = 88\,376\,181\,607 \text{ kHz}$$

con una incerteza estimada en  $\pm 2 \times 10^{10}$  [13].

### 2.4. Determinación de la longitud de onda de la línea de absorción del metano

Un láser de He-Ne estabilizado con la celda de metano resulta ser, además, un dispositivo adecuado para la metrología fundamental, por cuanto ofrece una radiación en la región óptica del espectro mejor definida que la propia línea anaranjada del criptón 86. La longitud de onda en el vacío correspondiente a dicha transición fue medida comparándola directamente con el patrón primario de criptón 86, obteniéndose el valor:

$$\lambda_{\text{CH}_4} = 3,392\,231\,40 \mu\text{m}$$

con una incerteza de  $\pm 4 \times 10^{-9}$  provocada exclusivamente por la incerteza del patrón primario mismo [14].

### 2.5. Medición de la velocidad de la luz

El resultado más espectacular de haber logrado determinar separadamente la frecuencia y la longitud de onda en el vacío de la línea de absorción del metano, es la medición de la velocidad de la luz. En efecto, la figura 3 muestra cómo se cierran ambas cadenas de comparación —la de frecuencias y la de longitud de onda— para dar lugar a la obtención de los mejores valores de la velocidad de la luz, planteando simplemente:

$$c = \lambda_{\text{CH}_4} \times \nu_{\text{CH}_4} = 299\,792\,458 \pm 1,5 \text{ m/s}$$

Este valor de la velocidad de la luz está afectado por la misma incerteza que el valor de  $\lambda_{\text{CH}_4}$ , es decir aquella que proviene de la definición de patrón primario de longitudes de criptón 86.

Estos resultados hicieron posible reformular la experiencia de Michelson-Morley para verificar la constancia de la velocidad de la luz empleando láseres estabilizados por absorción saturada [15]. De este modo pudo determinarse la isotropía del espacio con una sensibili-

dad 4000 veces mayor que la obtenida con el interferómetro de Michelson, esto es, con una incerteza de  $\pm 4 \times 10^{-5}$ .

Otras determinaciones, esta vez satelitarias [16], permitieron garantizar que el valor de la velocidad de luz no depende de la frecuencia de la radiación considerada. En efecto, la observación de algunos cuásares permite afirmar que las velocidades de propagación de los rayos X y de las ondas de radio por ellos emitidos, difieren en menos de  $10^{-5}$ .

Todos estos elementos sirvieron de argumentos firmes para que la Asamblea General de la Unión Científica Internacional de Radio, reunida en Varsovia en 1972, recomendara se acordase internacionalmente la adopción de un valor fijo e inamovible para la velocidad de la luz y se declarara a tal valor exacto por definición y, por lo tanto, libre de errores. La misma sugerencia preconizó la Unión Astronómica Internacional, a la vez que proponía se adoptara el valor de:

$$c = 299\,792,5 \text{ km/s},$$

lo cual redundará en grandes ventajas para los trabajos astronómicos y geodésicos.

Finalmente, atendiendo a los espectaculares resultados obtenidos en la medición de la velocidad de la luz y a las sugerencias realizadas, la Decimoquinta Conferencia General de Pesas y Medidas, reunida en 1975, resolvió definir su valor como:

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s},$$

sin error alguno.

### 3. PROPUESTAS PARA UNA NUEVA DEFINICIÓN DEL METRO

#### 3.1. Bases de las propuestas para definir el metro

Los antecedentes relativos a las mejoras en las determinaciones de frecuencias y de longitudes de onda de radiaciones ópticas, así como de la definición del valor de la velocidad de la luz, motivaron variadas propuestas sucesivas para definir el metro, las que fueron tratadas por el Comité Consultivo para la Definición del Metro en 1979.

Las propuestas fueron elevadas en consulta al Comité Consultivo para las Unidades como paso previo a un análisis detallado de las posibilidades reales de sustituir la definición del metro de 1960 basada en la lámpara de criptón 86.

Dichas propuestas contenían las siguientes definiciones:

- a) "El metro es la longitud del trayecto recorrido en el vacío por las ondas electromagnéticas planas durante el intervalo de tiempo de  $1/299\,792\,458$  de segundo".
- b) "El metro es la longitud igual a  $9\,192\,631\,770/299\,792\,458$  longitudes de onda en el vacío de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de cesio 133".

- c) "El metro es la longitud igual a  $f/299\,792\,458$  longitudes de onda en el vacío de una onda electromagnética plana infinita cuya frecuencia, expresada en hertz, tiene el valor numérico  $f$ ".

El texto de la definición a) fue el primero en ser observado por cuanto supeditaba la definición del metro a la del segundo. La definición b) también fue observada por cuanto no sólo supeditaba la definición del metro a la del segundo, sino porque, además, basaba su realización práctica a la del dispositivo experimental con el que se materializa el segundo. En la última propuesta, la definición c), aparece una peculiaridad si se compara su texto con los de las actuales definiciones de las unidades en vigencia: el valor numérico abstracto indefinido  $f$  que puede resultar incomprensible para los no especialistas.

En vista de la situación, el Comité Consultivo para la Definición del Metro decidió abrir un período de reflexión y consulta preparatorio de la reunión decisiva que se realizaría a mediados de 1982.

#### 3.2. Nuevas propuestas presentadas al Comité Consultivo para la definición del Metro. Comentarios

En el período de referencia no sólo se realizaron estudios y análisis sobre el texto de la definición del metro que reemplazaría a la de 1960, sino que se progresó sustancialmente en los resultados obtenidos en las mediciones de  $\lambda$  y de  $\nu$  de diversas radiaciones emitidas por láseres gaseosos de He-Ne y de argón ionizado y de láseres líquidos de colorantes estabilizados por efecto de la absorción saturada en transiciones de las moléculas de  $\text{CH}_4$  e  $\text{I}_2$  [17]. En general, todos los trabajos experimentales llevados a cabo en diversos laboratorios de metrología fundamental permitieron comparar sus resultados, lo que les brindó una elevada autoconsistencia y un gran reconocimiento internacional de confiabilidad. En ellos se comparaban las frecuencias o las longitudes de onda emitidas por los láseres estabilizados con el patrón de frecuencias de cesio 133 o el de longitudes de criptón 86. A su vez, se continuó consolidando el valor ya definitivamente aprobado de la velocidad de luz en 1975 por la Conferencia General de Pesas y Medidas.

Las nuevas propuestas que se hicieron llegar al Comité Consultivo para la Definición del Metro sugiriendo textos para la definición del patrón de longitudes, pueden agruparse en las siguientes formas:

- Basada en una longitud de onda  $\lambda$  hipotéticamente coincidente con el valor de la longitud del metro.
- Basadas en diversas frecuencias  $\nu$  de radiaciones electromagnéticas.
- Basadas en la constancia de la velocidad de la luz  $c$ .

A continuación se dan, siguiendo ese orden establecido, los textos de las sugerencias presentadas.

- a) Propuesta basada en la longitud de onda de la radiación.

la masa del prototipo internacional del kilogramo" y "El kelvin, unidad de temperatura termodinámica, es la fracción 1/273,16 de la temperatura termodinámica del punto triple del agua".

Al profundizar un poco más el análisis de los textos, aparece como válida la discusión sobre los considerandos que deben invocarse con el objeto de derogar una definición en uso para cambiarla por otra. Y ello se agudiza por cuanto la definición del metro en vigencia hace referencia directa a su puesta en práctica, mientras que las propuestas de nuevas definiciones están muy lejos de hacer imaginable algún modo de llevarla a la práctica. Si se releen los textos sugeridos en a), o cualquiera de los de b) o de c), se comprobará la diferencia sustancial que existe entre la definición y la posibilidad de instrumentación de la unidad de longitud.

En este aspecto debe reconocerse que quien más contribuyó a clarificar la cuestión, fue el actual Director Honorario del Bureau Internacional de Pesas y Medidas, Jean Terrien, quien a fines de 1980 señaló que deben necesariamente distinguirse tres aspectos fundamentales:

- Las consideraciones que motivan el cambio de definición de la unidad de longitud,
- la definición propiamente dicha,
- las reglas de puesta en operación de la definición

y que, recién después, se planteará el que toda definición debe satisfacer las dos condiciones siguientes:

- Ser simple y comprensible para alguien que no es físico.
- No ser ambigua para un físico [29].

Es en este marco de secuencias lógicas establecido para la consideración de las propuestas sobre una nueva definición del metro, que se fijaron las pautas de trabajo del Comité Consultivo para la Definición del Metro. La primera resolución que se adoptó fue la de proponer la realización de una reunión de expertos integrada por miembros de los Comités Consultivos para la Definición del Metro y de las Unidades con el objeto de considerar globalmente la cuestión en forma conjunta. Este Grupo de Trabajo se reunió en Sèvres los días 28 y 29 de abril de 1981 [30] arribándose a las siguientes conclusiones:

- 1) Una nueva definición del metro basada en la constancia de la velocidad de la luz debe ser propuesta a la Conferencia General de Pesas y Medidas en 1983, puesto que la definición actual se presenta ya como insuficiente para las experiencias realizadas en ciertos laboratorios.
- 2) Dentro de este contexto, el Comité Consultivo para la Definición del Metro y el Comité Consultivo para la Definición del Segundo deberán reunirse en 1982 para someter al Comité Internacional de Pesas y Medidas una propuesta aceptable.
- 3) Las diversas sugerencias que han sido estudiadas por el Grupo de Trabajo son científicamente satisfactorias y tendrán consecuencias semejantes desde el

punto de vista de la tecnología de las mediciones de longitudes.

- 4) Las diferentes preferencias que han sido expresadas en ellas resultan de ponderaciones diferentes de las consideraciones sobre simplicidad, generalidad, claridad, mínima perturbación del Sistema Internacional de Unidades o relación directa con la puesta en operación de la definición.
- 5) Por mayoría, los miembros del Grupo de Trabajo adhieren a una definición basada en el trayecto recorrido por la luz en un dado intervalo de tiempo.

En ellas puede observarse una cierta tendencia hacia la unificación de criterios alrededor de la definición del metro basada en la constancia de la velocidad  $c$ . De todos modos, se aprecia también el reconocimiento hacia las otras propuestas, las que han permitido una discusión directa y clarificadora. Es que, en definitiva, todas las propuestas son, desde el punto de vista físico, equivalentes. Y dicha equivalencia proviene de la simple expresión  $c = \lambda \nu$ .

En efecto, como la expresión general que representa la propagación de una onda plana según el eje de coordenadas  $x$ , es:

$$U(x,t) = f(x - ct),$$

mientras que la expresión para esa misma onda cuando se la considera como monocromática, es:

$$U(x,t) = e^{-i\left(\frac{x}{\lambda} + \omega t\right)},$$

donde  $k = \lambda/2\pi$  y  $\omega = 2\pi\nu$ , implica la validez de:

$$c = k\omega = \lambda\nu$$

El caso más trivial de equivalencia entre las definiciones se presenta al suponer una radiación de frecuencia  $\nu = 299\,792\,458$  Hz para materializar la unidad de longitud. Dicha radiación poseerá una longitud de onda  $\lambda = 1$  m y para realizar con ella una experiencia ideal interferométrica empleando un interferómetro de Fabry-Perot implicará utilizar un espaciador, por ejemplo, de un metro de longitud, como se muestra en la figura 4. Cuando la separación entre las placas del interferómetro sea  $L = 1$  m, se producirá la condición de resonancia entre la radiación y la cavidad interferencial, pudiéndose realizar la medición ideal de  $\lambda$ . La condición de resonancia se expresa según la ecuación:

$$p = \frac{2L}{\lambda},$$

siendo  $p$  el orden interferencial. Cuando  $p$  resulta ser de valor entero se obtiene interferencia constructiva. En el ejemplo de la figura 4, resulta  $p = 2$  y, por lo tanto:

$$L = \lambda = 1 \text{ m}$$

Además, el tiempo de tránsito de la radiación dentro de la cavidad será igual al período  $T$  y, por lo tanto, se puede expresar:

$$T = \frac{2L}{c} = \frac{2 \cdot 1 \text{ m}}{299\,792\,458 \text{ m s}^{-1}} = \frac{2}{\nu}$$

dos con la formulación de la nueva definición del metro, mientras que algunos de ellos integraron un grupo de trabajo para analizar los aspectos prácticos de la puesta en operación de la nueva definición.

#### 4.2. La propuesta de definición del metro

Atendiendo a los progresos logrados en la medición de frecuencias en el rango del visible y del cercano infrarrojo de radiaciones emitidas por varios tipos de láseres, la relación que existe entre dichas frecuencias y sus longitudes de onda determinadas interferométricamente y, fundamentalmente, sus reproducibilidades, el Presidente de las sesiones consultó a todos los asistentes sobre los siguientes tópicos:

- ¿Considera que se ha realizado suficiente cantidad de trabajo hasta ahora y que las exactitudes logradas en ellos permiten suponer que se obtendrán ventajas con la redefinición del metro?
- ¿Considera que ahora será posible llegar a un acuerdo sobre los detalles relativos a las especificaciones operativas de una nueva definición?
- ¿Considera que el momento es apropiado para recomendar que el metro debe ser redefinido?

Cada uno de los asistentes, por turno, debió responder las cuestiones planteadas. Sin ninguna reserva cada respuesta fue afirmativa y la mayoría de los asistentes expresaron su entusiasmo por la redefinición del metro.

Luego se pasó a discutir el texto que se sugeriría para la nueva definición de la unidad de longitud y por unanimidad se decidió emplear alguno basado en la constancia de la velocidad de la luz.

La aprobación del texto final por unanimidad, se obtuvo a través del análisis y discusión de cada parte de la definición. Una vez completada esta cuestión —que era de la mayor importancia y trascendencia— se pasó a la redacción de la recomendación con que se elevaría la nueva definición a la Conferencia General de Pesas y Medidas.

Se decidió que tal elevación se realizara mediante dos recomendaciones —técnicamente llamadas M1 (1982) y M2 (1982)— las que debían cubrir las cuestiones de la nueva definición y de su operabilidad, respectivamente. Se aprobó, a su vez, que ambas recomendaciones fueran giradas de inmediato al Comité Consultivo para las Unidades, el que se reuniría en la misma sede, entre el 8 y 10 de junio de 1982. Este Comité propuso mínimos cambios de redacción a las recomendaciones y sus textos definitivos serán presentados al Comité Internacional de Pesas y Medidas, el que se reunirá en octubre de 1982, para su aprobación y posterior elevación a la consideración de la Conferencia General de Pesas y Medidas que se reunirá en 1983.

A continuación se dan a conocer los textos de dichas recomendaciones. Dicen así:

##### Recomendación M1 (1982)

El Comité Consultivo para la Definición del Metro atento a su Recomendación M2 (1979) y

Considerando:

1. Que la definición actual no permite cumplimentar el metro lo suficientemente preciso para todos los requerimientos;
2. que los progresos realizados en la estabilización de láseres permiten obtener radiaciones más reproducibles y más fáciles de utilizar que la radiación patrón emitida por una lámpara de criptón 86;
3. que los progresos realizados en la medición de las frecuencias y de las longitudes de onda de dichas radiaciones han llevado a resultados concordantes de la determinación de la velocidad de la luz cuya exactitud está limitada principalmente por la concreción del metro según su definición actual;
4. que los valores de las longitudes de onda determinados a partir de las medidas de frecuencia y de un valor dado de la velocidad de la luz tienen una precisión superior a aquellos que pueden ser obtenidos por comparación con la longitud de onda de la radiación patrón del criptón 86;
5. que existe una ventaja, notable para la astronomía y la geodesia, de mantener fijo el valor de la velocidad de la luz recomendado en 1975 por la Decimoquinta Conferencia General de Pesas y Medidas en su Resolución 2 ( $c = 299\,792\,458$  m/s);
6. que una nueva definición del metro ha sido recomendada de varias formas todas basadas en un valor exacto de la velocidad de la luz, igual al valor recomendado, y que ellas no introducen ninguna discontinuidad apreciable en la unidad de longitud, teniendo en cuenta la incerteza relativa de  $\pm 4 \times 10^{-9}$  de las mejores concreciones del metro según su definición actual;
7. que estas diversas formas, sea haciendo referencia al camino recorrido por la luz en un intervalo de tiempo especificado o a la longitud de onda de una radiación de frecuencia medida o especificada, han sido objeto de consultas y discusiones en profundidad, que han sido reconocidas como equivalentes y que un consenso ha emergido en favor del primer tipo;
8. que el Comité Consultivo para la Definición del Metro está desde ahora en condiciones de dar instrucciones para la puesta en práctica de tal definición, instrucciones que podrán incluir el empleo de la radiación anaranjada del criptón 86 utilizada hasta ahora como patrón, las que podrán ser completadas o revisadas en lo sucesivo;

Recomienda:

- Que el metro sea definido como sigue:  
"El metro es la longitud del camino recorrido en el vacío por la luz durante el intervalo de  $1/299\,792\,458$  de segundo";
- que la definición del metro en vigencia desde 1960, basada en la transición entre los niveles  $2p_{10}$  y  $5d_5$  del átomo de criptón 86, sea derogada.

##### Recomendación M2 (1982)

El Comité Consultivo para la Definición del Metro

## Notas

(\*) Cada una de estas radiaciones puede ser reemplazada, sin degradar la exactitud, por una radiación correspondiente a otra componente de la misma transición o por otra radiación, cuando la diferencia de frecuencia sea conocida con suficiente exactitud. Detalles de los métodos de estabilización son descriptos en numerosas publicaciones científicas y técnicas. Referencias a los artículos apropiados e instrucciones sobre los modos operatorios aceptados para una radiación particular, pueden ser obtenidas solicitándolas a un laboratorio miembro del Comité Consultivo para la Definición del Metro, o al Bureau Internacional de Pesas y Medidas.

(\*\*) Esta incerteza y los valores de la frecuencia y de la longitud de onda están basados en el promedio ponderado de sólo dos determinaciones. La más precisa de las dos, sin embargo, fue una medida dependiente sólo de técnicas de mezclado y multiplicación de frecuencias relativas a la radiación señalada en 1.1.

## 2. Radiaciones de lámparas espectrales

### 2.1. La radiación correspondiente a la transición entre los niveles $2p_{10}$ y $5d_3$ del átomo de criptón 86:

El valor  $\lambda = 605\,780\,210,2$  fm con una incerteza relativa estimada de  $\pm 4 \times 10^{-9}$  (la que resulta de un desvío standard relativo estimado de  $1,3 \times 10^{-9}$ ) corresponde a la radiación emitida por la lámpara operada en las condiciones recomendadas por el Comité Internacional de Pesas y Medidas en 1963, con los valores indicados para las longitudes de onda y sus incertezas.

### 2.2. Las radiaciones de los átomos $^{86}\text{Kr}$ , $^{198}\text{Hg}$ y $^{114}\text{Cd}$ recomendadas por el Comité Internacional de Pesas y Medidas en 1963, con los valores indicados para las longitudes de onda y sus incertezas.

## OBSERVACIONES FINALES

La propuesta para una nueva definición de la unidad de longitud basada en la constancia de la velocidad de la luz pareciera cumplir un doble propósito de reconocimiento y homenaje a Galileo Galilei. Fue, en efecto, Galileo quien —intrigado por la validez de la afirmación que atribuye a la luz una velocidad de propagación infinita— concibió e intentó realizar un experimento para determinar su valor. El experimento consistió en ubicar de noche a dos observadores con sendas lámparas en las cimas de dos colinas cercanas. Ambos observadores podían verse mutuamente, de tal manera que cuando uno de ellos descubría su lámpara y el otro observaba esa señal luminosa trataba de determinar el tiempo transcurrido desde que había enviado su señal y hasta que recibía la otra. Medidos la distancia recorrida por la luz entre ambas colinas y el tiempo de tránsito, Galileo esperaba poder determinar el valor finito de la velocidad de propagación de la luz. Bien sabido es que el experimento de Galileo dio resultados negativos, aunque fue la base conceptual de las experiencias terrestres de Fizeau y de Foucault para determinar el valor de  $c$ .

El avance de la física y de la tecnología permitieron en cada época abrir posibilidades ni siquiera sospechadas en la anterior en lo referente a la determinación de la velocidad de la luz, específicamente, y a todas las determinaciones de interés metrológico, en general. En la Sección 2.3. se hizo mención al empleo del diodo a "bigote" para mezclar y multiplicar las frecuencias de las fuentes de radiación, como los láseres y los klystrons, o de sus armónicas. La importancia del diodo a bigote metal-aislante-metal reside fundamentalmente en que su rango de aplicabilidad se extiende desde 9 GHz hasta 90 THz, al menos hasta ahora. Sin embargo, en algunos experimentos para determinar la frecuencia de emisión de ciertos láseres estabilizados por absorción saturada se han empleado diodos que actúan por efecto Josephson, constituidos por junturas de niobio a temperaturas de helio líquido, en algunos eslabones de la cadena de mediciones. Los diodos Josephson son útiles en el rango de frecuencias que se extiende desde 12 GHz hasta 7 THz.

Esto constituye un ejemplo que ilustra cómo la actividad metrológica fundamental, tal como se ha descrito en las secciones previas, se ha ido desplazando desde formas clásicas de definir e implementar la unidad de longitud hacia formas más modernas, como las actuales. Ello permite cambiar hasta la denominación misma de la actividad, lo que se ha puesto de manifiesto ya en algunos países, en los que se la denomina metrolología cuántica.

Puede señalarse que esta tendencia comenzó, en realidad, con las propuestas de cambio de la definición del metro patrón mediante el empleo de la barra de platino iridiado por la radiación emitida por algunos átomos, como los del cadmio, mercurio o criptón. Se acentuó luego dicha tendencia con la propuesta de cambio de la definición del segundo con el empleo de la radiación emitida por el cesio.

Pareciera, por último, que la propuesta de definición del metro basada en la constancia de la velocidad de la luz y su implementación por el uso de transiciones atómicas estimuladas emitidas por láseres estabilizados por absorción saturada, es un paso definitivo hacia el establecimiento de la metrolología cuántica.

## REFERENCIAS

- [1] J. TERRIEN. *De Ingenieur*, 27 A543 (1970).
- [2] A.A. MICHELSON y J.R. BENOIT. *Travaux et Memoires du Bureau International des Poids et Mesures*, XI (1894).
- [3] C. FABRY, J.R. BENOIT y A. PEROT. *Travaux et Mémoires du Bureau International des Poids et Mesures*. XV (1913).
- [4] W.R.C. ROWLEY y J. HAMON. *Rev. Opt.*, 42, 519 (1963).
- [5] T.H. MAIMAN. *Nature (Londres)*, 187, 493 (1960) y *Brit. Commun. Electron.*, 7, 674 (1960).
- [6] A. JAVAN, W.R. BENNETT (Jr.) y D.R. HERRIOT. *Phys. Rev. Lett.*, 6, 106 (1961).  
A.D. WHITE y J.D. RIDGEN. *Proc. IRE*, 50, 1967.
- [7] Comité Consultatif pour la Définition du Mètre, 3a Sesión, 1962. Gauthier-Villars, París, 1962.