

MEDICIÓN DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN DEL AIRE A 9.2 GHz USANDO CAVIDADES RESONANTES DE RAMSEY

S. López López, J.M. López Romero E. de Carlos- Lopez
 División de Tiempo y Frecuencia, Centro Nacional de Metrología
 km. 4.5 Carr. a Los Cues, El marqués, Qro. C.P. 76246
 Tel. (442) 211 05 00 ext. 3208, correo electrónico: slopez@cenam.mx

Resumen: En este trabajo se presentan los resultados de las mediciones obtenidas para la determinación del índice de refracción del aire en condiciones normales de temperatura, humedad y presión, a una frecuencia de 9.2 GHz. El método utilizado hace uso de la variación de la frecuencia de resonancia de cavidades de microondas, cuando se mide dicha frecuencia de resonancia en vacío y en aire a presión atmosférica dentro de una cámara de alto vacío. Estas cavidades son diseñadas para operar en relojes atómicos de Cesio-133 en condiciones de ultra-alto vacío. La razón entre la frecuencia de resonancia en vacío y la frecuencia de resonancia en aire, aporta información para la determinación del índice de refracción del aire.

1. INTRODUCCIÓN

Las cavidades resonantes de microondas, usadas para promover la transición entre los niveles hiperfinos del estado base del átomo de cesio-133 en los relojes atómicos, operan en un ambiente de ultra-alto vacío. Sin embargo, la mayoría de las mediciones que se realizan para caracterizar las cavidades de microondas, se hacen en presencia de aire a presión atmosférica, esto tiene como consecuencia que la frecuencia de resonancia tenga un corrimiento debido a la diferencia del índice de refracción del aire y del vacío. Esta diferencia en la resonancia se debe de tomar en cuenta en el diseño de las cavidades resonantes, con el objeto de minimizar el efecto de desintonía en la cavidad (en inglés el llamado *cavity pulling*) [1], que puede provocar corrimientos en la medición de la resonancia entre los estados hiperfinos hasta en partes en 10^{15} en los relojes de haz térmico, y en los relojes de fuente de átomos este corrimiento se puede minimizar, pudiendo llegar a ser de partes en 10^{16} [1][2]. Por otro lado, el índice de refracción del aire, ha sido ampliamente estudiado en las regiones ópticas, del infrarrojo y del ultravioleta cercano [3][4][5][6][7][8][9]. Sin embargo, en la región de microondas, particularmente alrededor de 9.2 GHz, no se han encontrado publicaciones acerca del valor numérico del índice de refracción, lo cual ha motivado el desarrollo del presente trabajo, ya que el índice de refracción del aire para 9.2 GHz revisten especial importancia a efecto de que las cavidades de microondas usadas en los relojes atómicos, mismas que operan en el vacío, tengan la resonancia lo más cercana posible a la frecuencia de la transición que define a la unidad de tiempo del

Sistema Internacional de Unidades, el segundo, la cual es de 9192 631 770 Hz.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En la mayoría de la mediciones de alta exactitud, publicadas recientemente, del índice de refracción del aire, se hace uso de la ecuación de Ciddor [7] o bien la ecuación modificada de Edién [8], donde se contempla la variación de la longitud de onda de la radiación al pasar del vacío a aire, permaneciendo constante la frecuencia de dicha radiación. Sin embargo cuando se usan cavidades resonantes, la longitud de onda se obliga a permanecer constante a la resonancia de la cavidad. Este hecho es usado en el presente trabajo con el propósito de determinar el índice de refracción del aire en 9.2 GHz.

La relación entre la longitud de onda λ , la frecuencia ν y la velocidad v de propagación para la radiación electromagnética en un medio de propagación es [10]

$$v = \lambda \nu \quad (1)$$

Por otro lado, la velocidad de propagación de la radiación electromagnética en términos del índice de refracción puede escribirse como:

$$v = \frac{c}{n} \quad (2)$$

Aquí c es la velocidad de la luz en el vacío, y n el índice de refracción del medio en el que se propaga la radiación, en particular, en la frecuencia de resonancia ν_r en el aire, la longitud de onda es:

—
 dado que en la resonancia, la longitud de onda de la radiación de microondas permanece constante tanto en el vacío como en el aire, pues se trata de una onda estacionaria contenida en una cavidad resonante, la cual en principio no cambia sus dimensiones al pasar del aire al vacío, tenemos entonces que en el vacío se debe cumplir.

—
 donde ν_{or} es la frecuencia de resonancia en el vacío. Igualando estas dos últimas expresiones y despejando el índice de refracción tenemos:

—
 Es decir, el índice de refracción puede ser determinado a través del cociente de dos resultados de medición, a saber: las frecuencias de resonancia tanto en el vacío como a presión atmosférica en presencia de aire. Este método de medición es muy atractivo ya que la medición de frecuencia se puede hacer con alto nivel de exactitud con relativa facilidad.

3. DETALLES EXPERIMENTALES

3.1. Cavidad de microondas del reloj de haz térmico

La cavidad usada en reloj de haz térmico, es una cavidad rectangular en forma de U alargada, la cual lleva el nombre de cavidad de Ramsey, en honor a N. Ramsey quien es el que por primera vez desarrolló y estudió ampliamente este tipo de cavidades. La cavidad consiste en un bloque de cobre electrolítico que se maquinó en su interior en forma de herradura. Las dimensiones de la cavidad son tales que, bajo una configuración tipo H, la cavidad opera en el modo TE001 y en la resonancia solo permite que dentro de la cavidad estén presentes un número semi-entero de longitudes de onda correspondientes a la frecuencia de resonancia de la misma. En la figura 1 se presenta un esquema con las dimensiones de la cavidad y en la figura 2, una fotografía de la misma.

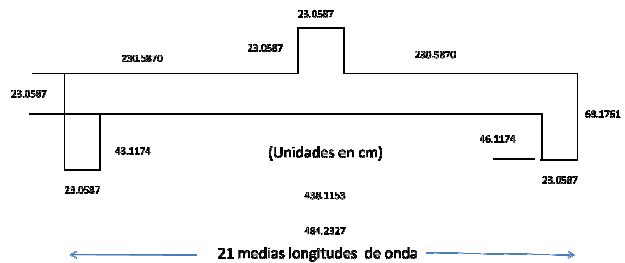


Fig.1 Esquema de la cavidad de Ramsey y sus dimensiones, usada para mediciones del índice de refracción del aire a 9.2 GHz.



Fig. 2 Fotografía de la cavidad de Ramsey, fabricada en cobre electrolítico para el reloj de haz térmico CsOP-2.

3.2. Mediciones de la frecuencia de resonancia en la cavidad de Ramsey.

Las mediciones de la frecuencia de resonancia se hicieron con un analizador de espectros HP modelo 8566B referenciado en frecuencia a un reloj de Cesio de tipo comercial. Se midió la potencia reflejada de la cavidad de Ramsey dentro del tubo de cesio del reloj atómico de haz térmico CsOP-2, inicialmente a presión atmosférica y después con un ultra-alto vacío alrededor de 1.5×10^{-6} Pa. Se observó el pico correspondiente a la resonancia alrededor de 9.2 GHz, tal como se esperaba este pico cambió de posición al hacer vacío en la cámara, en alrededor de 2.5 (0.1) MHz. En la figura 3 se muestra una fotografía del tubo de cesio usado como cámara de vacío para las mediciones de resonancia.

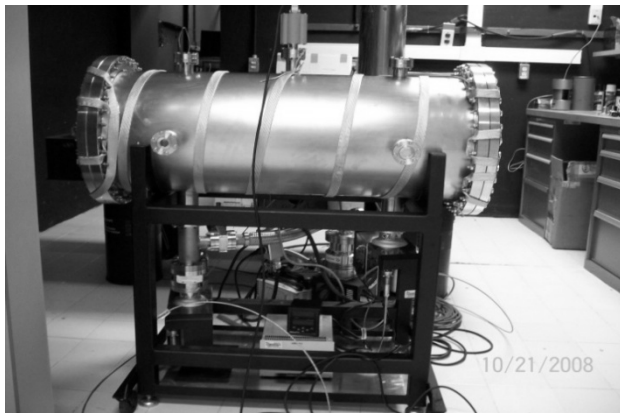
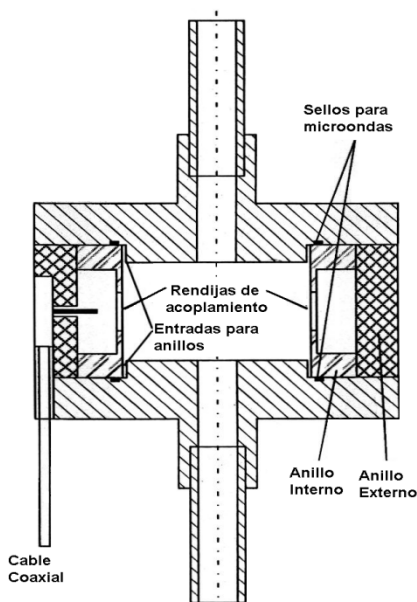


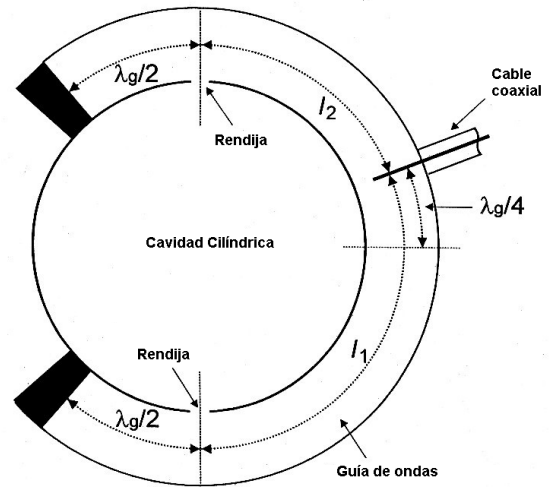
Fig. 3 Cámara de Vacío usada para la medición de la potencia reflejada de la cavidad de Ramsey alrededor de la resonancia.

3.3. Cavidades de microondas de la fuente de átomos

El reloj de fuente de átomos usa dos cavidades de microondas idénticas, que operan de tal manera que la resonancia se encuentre alrededor de 9.2 GHz. Una primera cavidad, llamada de selección, prepara a los átomos y los coloca en un solo nivel de energía. La segunda cavidad promueve la transición hiperfina del estado base de los átomos de Cesio-133. Estas cavidades fueron diseñadas para tener una variación en fase transversal muy baja, a través de la apertura por donde atraviesan los átomos.



(a)



(b)

Fig. 4 Esquema de la cavidad de microondas diseñada para el reloj de fuente de átomos del CENAM, CsF-1 y usada para mediciones del índice de refracción del aire. a) vista lateral, b) vista superior.

Este diseño consiste en una cavidad cilíndrica que opera en el modo TE₀₀₁, con un factor de calidad alto, la cual es alimentada simétricamente a través de dos aperturas opuestas en las paredes de la cavidad. Un esquema de la cavidad se presenta en la figura 4, y una fotografía de la misma en la figura 5.



Fig. 5. Fotografía de las cavidades de microondas usadas para la medición del índice de refracción del aire. Las cavidades se muestran acopladas tal como operan dentro del reloj de fuente de átomos CsF-1

3.4 Mediciones de la frecuencia de resonancia en las cavidades de microondas del reloj de fuente atómica.

Para las cavidades de resonancia del reloj de fuente de átomos se hicieron mediciones de la potencia reflejada utilizando para tal propósito un analizador de redes vectorial HP modelo 8510C. Las cavidades fueron introducidas en una cámara de alto vacío, alcanzando inicialmente una presión de 2×10^{-3} Pa, las mediciones se hicieron con una presión de 0.1 Pa. En la figura 6 se muestra una fotografía de la cámara de vacío empleada. Ambas cavidades se introdujeron a la cámara de vacío simultáneamente y acopladas de la misma manera en la que operan dentro del tubo de vuelo del reloj de fuente de átomos CsF-1. En la figura 7 se muestra el interior de la cámara con las cavidades acopladas y conectadas a los pasa-muros que alimentan a las cavidades desde el exterior hacia la cámara de vacío. De igual manera que en la cavidad de Ramsey, se observó la resonancia de la cavidad alrededor de 9.2 GHz y el corrimiento en la misma cuando se dejó introducir aire a la cámara de vacío de 1.8 (2) MHz. En la figura 8 se muestra una fotografía de los dispositivos de medición en el laboratorio.



Fig.6 Cámara de vacío conectada a una bomba turbomolecular, asistida por una bomba mecánica. En el interior de la cámara se introdujeron las cavidades de microondas de la fuente de átomos CsF-1.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1. Cavidad de Ramsey

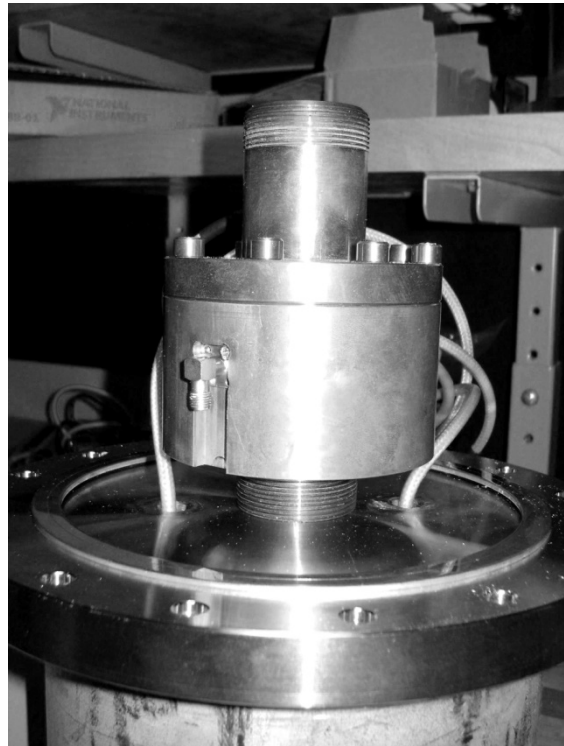


Fig. 7 Interior de la cámara de alto vacío, usada para las mediciones del índice de refracción de aire, donde se muestra una de las cavidades de microondas del CsF-1.

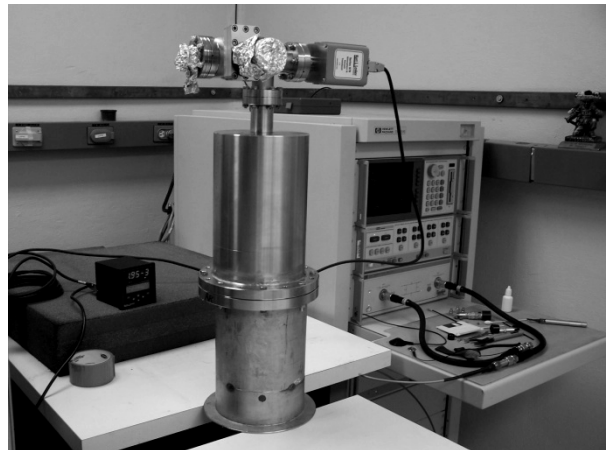


Fig. 8 Mediciones de la potencia reflejada alrededor de 9.2 GHz de las cavidades de microondas del CsF-1, en alto vacío y a presión atmosférica.

En la gráfica de la figura 9 se presentan los espectros de la potencia reflejada en función de la frecuencia de barrido, obtenidos alrededor de la

frecuencia de resonancia de la cavidad de Ramsey (para reloj de haz térmico), tanto a presión atmosférica (presencia de aire) como en ultra alto vacío. Se observa la resonancia alrededor de 9.2 GHz. El valor de la frecuencia de resonancia en vacío es menor que con la presencia de aire, tal como se esperaba. Los valores obtenidos fueron los siguientes:

$$\nu_{or} = 9202.2 \pm 0.1 \text{ MHz (en vacío)}$$

$$\nu_r = 9200.7 \pm 0.1 \text{ MHz (presión atmosférica)}$$

La incertidumbre de medición es debida principalmente a la resolución del analizador de espectros utilizado en dichas mediciones. Dicha resolución se fijó en 0.1 MHz. La incertidumbre en frecuencia asociada a los osciladores de los equipos utilizados es menor a 1 Hz para la frecuencia de 9.2 GHz, misma que puede considerarse despreciable comparada con la magnitud de la resolución. Con estos datos y usando la fórmula (5) se obtiene

$$n = 1.000163 \pm 1.5 \times 10^{-5}$$

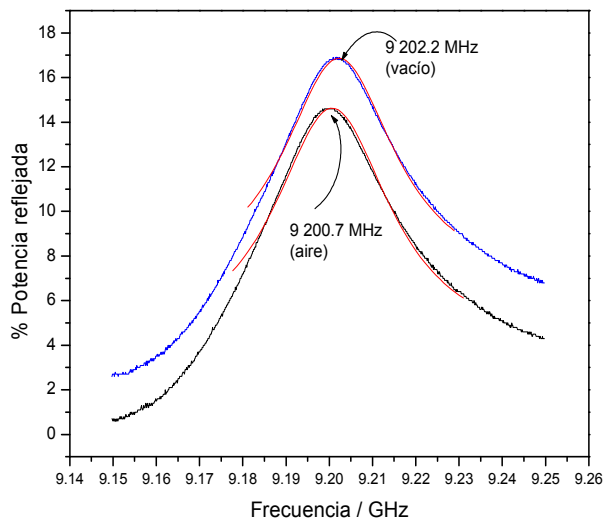


Fig. 9 Espectros de reflexión alrededor de la resonancia de la cavidad de Ramsey, en vacío y aire. Las curvas en rojo representan ajustes lorentzianos para una mejor determinación del pico de resonancia.

4.2. Cavidad de fuente atómica

Las gráficas de las figuras 10 y 11 muestran los espectros de reflexión de las cavidades de microondas de selección y de transición respectivamente, usadas en el CsF-1, alrededor de la frecuencia de resonancia de 9.2 GHz tanto para

mediciones en vacío como en presencia de aire a presión atmosférica. Tal como se espera los valores de la frecuencia de resonancia al igual que en la cavidad de Ramsey se corren ligeramente a frecuencias menores en presencia de aire.

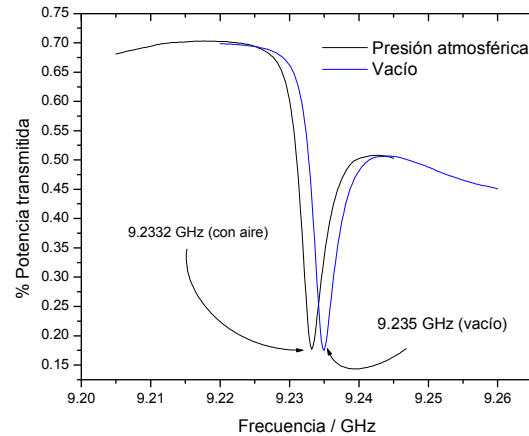


Fig 10. Espectro de reflexión de la cavidad de microondas de selección del CsF-1.

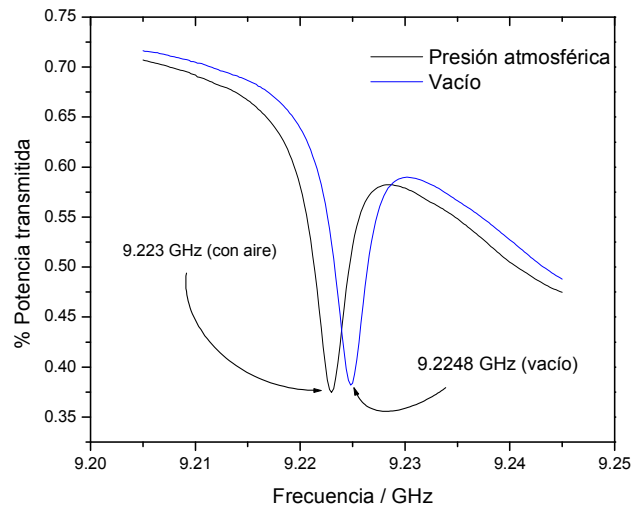


Fig. 11 Espectro de reflexión de la cavidad de transición del CsF-1.

Con los datos obtenidos para ambas cavidades, podemos determinar el índice de refracción el cual nos da un valor de:

$$n = 1.00019 \pm 3.1 \times 10^{-5}$$

para la cavidad de selección y de:

$$n = 1.00021 \pm 3.1 \times 10^{-5}$$

para la cavidad de transición.

Las diferencias en los valores del índice de refracción para el aire, medidos en las diferentes cavidades, están dentro de la incertidumbre, asociada principalmente como ya se ha mencionado a la resolución de los equipos, sin embargo también puede ser ocasionada por diferencias en temperatura al momento de hacer las mediciones. Cabe señalar que estas mediciones nos han permitido observar una ligera desintonía en las cavidades de la fuente de átomos hacia frecuencias altas, lo que indica que hay que ajustar la resonancia de las mismas para evitar al máximo el llamado *cavity pulling*.

5. CONCLUSIONES

Con el método descrito en la sección de fundamentos teóricos, se ha podido medir con alto nivel de exactitud el índice de refracción del aire para 9.2 GHz. Cabe señalar que no se han encontrado hasta ahora, en la literatura especializada, información sobre este valor, sin embargo como se ha mencionado anteriormente, el índice de refracción del aire se ha medido con muy alta exactitud para regiones que van desde el infrarrojo cercano, hasta el ultravioleta cercano. Es oportuno hacer notar que los valores publicados para el índice de refracción en frecuencias ópticas son mayores que el reportado en este trabajo para microondas, lo cual parece estar de acuerdo con la teoría electromagnética, ya que fuera de la resonancia de un material, el índice de refracción es una función creciente respecto a la frecuencia [11].

Un estudio más completo del índice de refracción en la región de interés, de 9.2 GHz, contempla el análisis a diferentes temperaturas, en parte porque la resonancia de las cavidades de microondas usadas en el presente trabajo es muy sensible a variaciones de temperatura. También es factible hacer mediciones del índice de refracción del aire a diferentes frecuencias en la región de las microondas usando cavidades sintonizables. Por último se podrían hacer mediciones del índice de refracción para diferentes presiones, contenidos de humedad, y composición. Así mismo este método puede implementarse con facilidad para realizar mediciones del índice de refracción de diferentes gases en la misma región de microondas introduciendo dichos gases a la cámara de vacío.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento por el apoyo recibido al Centro Nacional de Metrología, asimismo, un especial agradecimiento a la M en C. Susana Padilla del Corral del laboratorio de analizadores de redes, de la División de Mediciones electromagnéticas del CENAM por la valiosa colaboración en la toma de espectros de potencia reflejada.

REFERENCIAS

- [1] D. B. Sullivan, J. C. Bergquist, J. J. Bollinger, R. E. Drullinger, W. M. Itano, S. R. Jefferts, W. D. Lee, D. Meekhof, T. E. Parker, F. L. Walls, and D. J. Wineland. "Primary Atomic Frequency Standards at NIST". *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.* 2001. **106**, 47–63.
- [2] V Gerginov, N Nemitz, S Weyers, R Schröder, D Griebisch and R Wynands. "Uncertainty evaluation of the caesium fountain clock PTB-CSF2". 2010. *Metrologia* **47** 65–79.
- [3] Meggers, W. F. & Peters, C. G. "Measurements on the Index of Refraction of Air for Wavelengths from 2218 Å to 9000 Å". *Astrophysical Journal*, vol. **50**, 1919. p.56-71
- [4] Serway, Raymond., Faughn, Jerry S. "The Law of Refraction." *College Physics*. Sixth edition, Pacific Grove, CA: Brooks/Cole-Thomson Learning, 2003: 692.
- [5] Lide, David R. "Index of Refraction of Air." *Handbook of Chemistry and Physics*. 75th edition. Boca Raton, FL, CRC Press Inc., 1994: 10-302.
- [6] Selloy, Samuel M. "Index of Refraction of Air." *Handbook of Chemistry and Physics*. 48th edition, Cleveland OH, The Chemical Rubber Co., 1967: E-160.
- [7] Phillip E. Ciddor, "Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared," *Appl. Optics* **35**, 1996.1566-1573.
- [8] B. Edlén, "The refractive index of air," *Metrologia* 1966. **2**, 71-80.
- [9] Jack A. Stone and Jay H. Zimmerman, *Engineering metrology toolbox* <http://emtoolbox.nist.gov/Wavelength/Documentation.asp#VacuWavelength>, 19 de julio de 2010.
- [10] E. Hecht, A. Zajac. *Optics*, Ed. Pearson Education, 2003.
- [11] John David Jackson. *Classic Electrodynamics*, John Wiley and Sons, Inc. 1962.