



El famoso meteorito Hoba: resultados Mössbauer y de microscopía electrónica

Angel Rivas^{1*}, Nelson Falcón¹, Edgar Jaimes², Carlos Rojas³

¹ Universidad de Carabobo. Fac. de Ciencias y Tecnología. Departamento de Física. Valencia, Venezuela.

² Universidad Central de Venezuela. Fac. de Ciencias. Departamento de Física. Caracas, Venezuela.

³ Universidad Central de Venezuela. Fac. de Ciencias. Centro de Microscopía Electrónica. Caracas, Venezuela.

*Autor de correspondencia: aerivas1@uc.edu.ve

Resumen

En este trabajo presentamos los resultados preliminares del estudio por Espectroscopía Mössbauer y microsonda electrónica de un fragmento del meteorito Hoba (Grootfontein, Namibia). Los espectros Mössbauer fueron obtenidos con un espectrómetro de transmisión en modo triangular simétrico, usando una fuente de Co^{57}/Rh . El análisis por microsonda electrónica se hizo mediante la técnica WDS. Los resultados muestran que el meteorito Hoba contiene en mayor proporción una aleación de Fe-Ni pobre en Ni compatible con la fase kamacita, con un campo hiperfino de 335 kG a temperatura ambiente. Los resultados de la composición química elemental de las dos zonas exploradas por la técnica WDS, sobre una lámina pulida del meteorito, indican una zona rica en Ni y otra zona pobre en Ni.

Palabras Claves: Meteorito Hoba, Espectroscopía Mössbauer, Microsonda Electrónica, Kamacita, Taenita

The famous Hoba meteorite: Mössbauer and electron microscopy results

Abstract

In this work we present the preliminary results of Mössbauer Spectroscopy and electronic microprobe study of a Hoba meteorite fragment (Grootfontein, Namibia). The Mössbauer spectra were obtained with a transmission spectrometer in triangular symmetrical mode, using a Co^{57}/Rh source. The analysis by electronic microprobe has been made by means of WDS technique. The Results show that the Hoba meteorite contains a Fe-Ni alloy poor in Ni in mayor proportion, compatible with the phase kamacite, with a hyperfine field of 335 kG at room temperature. The Results of the elemental chemical composition of the two areas explored by the WDS technique, on a polished surface of the meteorite, indicate a Ni-rich area and another one Ni-poor area.

Keywords: Hoba meteorite, Mössbauer Spectroscopy, Electronic Microprobe, Kamacite, Taenite

Introducción

Los meteoritos, también llamados *mensajeros del espacio*, son fragmentos de asteroides y cometas que han caído en la superficie terrestre (Heide & Wlotzka, 1995). Su estudio ha sido siempre de gran interés por la información que pueden aportar sobre el pasado remoto de nuestro sistema solar y forma parte muy importante de la investigación espacial de la actualidad. Estos cuerpos están ligados a eventos ocurridos en procesos tempranos de la formación de las estrellas y por ende aportan conocimientos de gran relevancia en cuanto al origen de nuestro sistema solar y hasta el origen mismo de la vida.

En particular, el estudio de los meteoritos metálicos o *sideritos* (conocidos en inglés como *iron meteorites*), compuestos principalmente por aleaciones de Fe-Ni en dos fases llamadas kamacita y taenita, reviste especial importancia al relacionarlos con las primeras etapas de la formación de los núcleos metálicos de los planetas y su posterior evolución. Está plenamente establecido que tales aleaciones se han formado a una tasa de enfriamiento de alrededor 1°C/millón de años (Scorzelli, 2008).

Dentro de los meteoritos metálicos, el meteorito Hoba ha adquirido fama por estar entre los de mayor tamaño que han impactado la tierra y que han sobrevivido al impacto. El Hoba es el fragmento de meteorito más grande conocido, con un peso aproximado de 60 toneladas (Mason, 1962). Este meteorito cayó en Grootfontein, Namibia, y fue encontrado en 1920. El meteorito Hoba es de la clase ataxita (sin estructura) y pertenece al grupo IVB. Un fragmento de 9x9x3,2 pies y 60 toneladas se encuentra a unas 12 millas de Grootfontein, Namibia (Graham et al., 1985). La Fig.1 es una fotografía de este meteorito.

Se cree que este fragmento de meteorito logró llegar a la superficie terrestre sin desintegrarse y sin dejar un cráter, debido probablemente a la relativamente baja velocidad de impacto y a un ángulo de caída pequeño, tal como se indica en el trabajo de (Artemieva & Bland, 2003).

En el trabajo de (Spencer, 1932) se hace una recopilación de la información más importante que se tenía para ese momento sobre el meteorito Hoba. En particular se dan datos sobre su composición química: Fe 83 %, Ni 16 %, Co 1 % y trazas de Cu, S, P y C, con una relación Fe/Ni de 5. (Axon & Smith, 1972) realizaron un estudio metalográfico de varios meteoritos



Figura 1. Fotografía del meteorito Hoba tomada por Giraud Patrick el 13 de agosto de 2006 y disponible en <http://geology.com/records/largest-meteorite/>.

con alto contenido de níquel, entre ellos el meteorito Hoba (16,3 %Ni). Su estudio revela la presencia de las fases kamacita y taenita en este meteorito.

El meteorito Hoba ha sido estudiado mediante espectroscopía Mössbauer (EM) por (Remo, 1977), en donde se obtuvieron espectros a temperatura ambiente y a 77 K, y también después de tratamiento térmico y posterior enfriamiento rápido y lento. Sus resultados indican la presencia de una fase paramagnética rica en níquel ($\sim 26\%$) a temperatura ambiente, así como también la fase kamacita (con estructura bcc) y/o taenita (con estructura fcc). La fase paramagnética fue atribuida a kamacita (fcc).

La química y la mineralogía de los productos de oxidación en la superficie del meteorito Hoba fue estudiada por (Golden et al., 1995) mediante análisis por microsonda electrónica (EPMA, por sus siglas en inglés), microscopía electrónica de barrido y difracción de rayos X. El análisis de rayos X indica la presencia de maghemita ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$), magnetita (Fe_3O_4), goetita ($\alpha\text{-FeOOH}$) y lepidocrocita ($\gamma\text{-FeOOH}$). El análisis por EPMA de superficies pulidas indican la presencia de Ni en las facies mineralógicas. En este último trabajo se usó también la EM para determinar la cantidad relativa de maghemita y magnetita, sin embargo no se dan más detalles ni se muestran los espectros Mössbauer.

La EM del isótopo ^{57}Fe ha resultado ser una técnica de amplia aplicación en el estudio de meteoritos metálicos, principalmente en la identificación de las fases Fe-Ni, así como también de los productos de corrosión originados por la acción de los factores climáticos en la superficie terrestre. Esto incluye la

determinación de la mineralogía, los estados de oxidación y la química cristalina del hierro en estos meteoritos. De igual forma, la técnica de la microsonda electrónica aporta información valiosa sobre la composición química del meteorito bajo estudio (especialmente la presencia de Ni), lo cual permite complementar la información obtenida mediante la espectroscopía Mössbauer.

Presentamos en este trabajo un estudio preliminar mediante EM y microsonda electrónica de un fragmento del meteorito Hoba, con la finalidad de dar un nuevo aporte a la valiosa información científica que se tiene hasta los momentos sobre este famoso meteorito, en particular sobre la mineralogía y la composición química elemental de la muestra bajo estudio. Los resultados de EM evidencian la presencia de las facies kamacita y (posiblemente) taenita, propias del cuerpo del meteorito, y una fase oxidada producto de la corrosión de la superficie del meteorito.

Procedimiento Experimental

La muestra. Se dispuso de un pequeño fragmento de color oscuro de aproximadamente 2 g del meteorito Hoba, de aspecto oxidado. Para su posterior análisis el fragmento fue cortado con un disco de diamante. En la Fig. 2 se aprecia el fragmento de meteorito cortado y las dimensiones aproximadas del mismo.



Figura 2. Fotografía del fragmento del meteorito Hoba usado para el estudio.

Con la finalidad de analizar la parte externa (oxidada) y el cuerpo del meteorito, se prepararon dos

absorbentes Mössbauer. El primero, llamado A1, a partir de un trozo de aproximadamente 200 mg, el cual fue triturado en un mortero de ágata hasta pulverizarlo. Con el polvo (unos 80 mg) se preparó el absorbente Mössbauer en araldita. El segundo, llamado A2, fue preparado a partir de pequeñas láminas del meteorito de unos 150 μm de espesor, cortadas del fragmento original con un disco de diamante y posteriormente pulidas. En la Fig. 3 puede verse el mosaico de láminas del meteorito usadas como absorbente. Para el análisis en el Microscopio Electrónico,

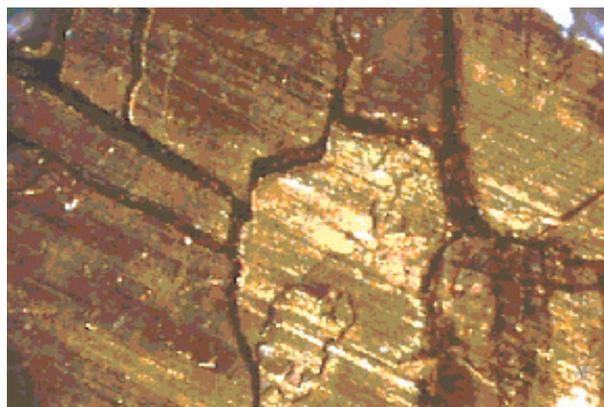


Figura 3. Láminas de 150 μm de espesor de un fragmento del meteorito Hoba usadas como absorbente Mössbauer. Se pueden apreciar las fracturas del fragmento del meteorito.

una de las láminas del meteorito fue embutida en una resina epóxica y pulida manualmente con lija de 2000 grid y polvo de alúmina.

Espectroscopía Mössbauer. Los espectros fueron obtenidos con un espectrómetro de transmisión, con una señal de velocidad triangular simétrica, y un sistema de adquisición de datos de 512 canales. Como fuente de rayos γ se utilizó ^{57}Co en una matriz de Rh. Este isótopo decae por captura electrónica al estado excitado con espín nuclear $I = 5/2$ del ^{57}Fe . La radiación gamma usada es de 14,4 keV correspondiente a la transición entre los niveles nucleares con espín $I = 3/2$ e $I = 1/2$ del ^{57}Fe (Chen & Yang, 2007; Wertheim, 1964). Los espectros se obtuvieron a temperatura ambiente, tanto para el absorbente A1 como para el A2. Los valores de los parámetros hiperfinos se obtuvieron mediante el ajuste de los espectros usando un programa iterativo por el método de mínimos cuadrados.

Microscopía electrónica. Se utilizó la Microsonda Electrónica de Barrido de Rayos X Característicos

(EPMA, por sus siglas en inglés) marca Jeol Superprobe modelo JXA-8900R, con un voltaje acelerador de 20 kV y una corriente del haz de electrones de 23 nA. Se usó la técnica WDS (Wavelength Dispersive Spectrometer, por sus siglas en inglés) para el análisis de la composición química del meteorito, mediante el procedimiento de mapeo cualitativo sobre un área de $\sim 150\mu\text{m} \times 150\mu\text{m}$, con un intervalo de $1\mu\text{m}$. Se hizo uso de un solo espectrómetro WDS (LIFJ), ya que el hierro y el níquel generan líneas cercanas. Las imágenes fueron obtenidas con el detector de electrones retrodispersados en modo COMPO.

Resultados y Discusión

Espectros Mössbauer

En la Fig.4 se presenta el espectro Mössbauer a temperatura ambiente para el absorbente A1 y en la Fig.5 el espectro Mössbauer, también a temperatura ambiente, para el absorbente A2. En las figuras, la línea continua (de color rojo) sobre los puntos experimentales es el mejor ajuste obtenido.

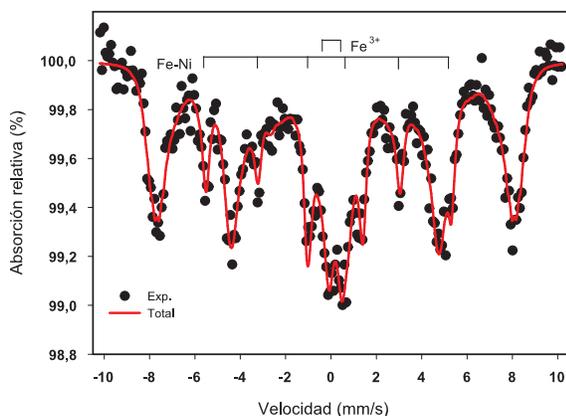


Figura 4. Espectro Mössbauer a temperatura ambiente del meteorito Hoba (absorbente A1, polvo).

El espectro de la Fig.4 fue ajustado mediante la superposición de un doblete central (dos líneas), una amplia distribución de campos hiperfinos (DCH), con un campo hiperfino más probable de 490 kG a nivel del núcleo de hierro, y un subespectro de seis líneas con un campo hiperfino (CH) de 335 kG (posición de los picos indicada por las seis líneas verticales).

El espectro de la Fig.5 fue ajustado también mediante la superposición de un doblete central (proporción de 3%), una pequeña distribución de campos hiperfinos (proporción de 9%), con un campo hiper-

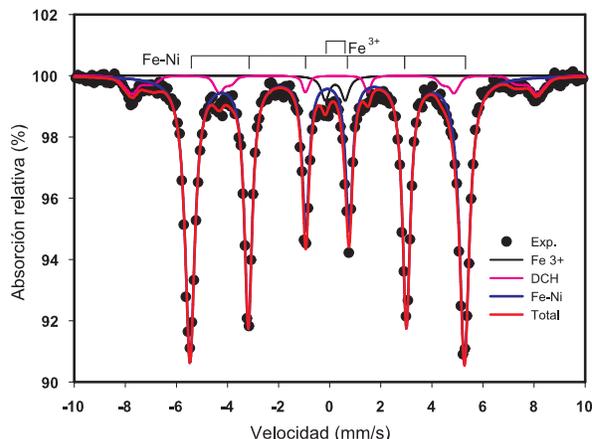


Figura 5. Espectro Mössbauer a temperatura ambiente del meteorito Hoba (absorbente A2, láminas).

fino más probable de 490 kG, y un subespectro de seis líneas (proporción de 88%) con un campo hiperfino de 335 kG. Este subespectro de seis líneas se ajustó con tres dobletes independientes para tomar en cuenta el efecto de saturación causado por el espesor del absorbente, calculándose el campo hiperfino de la separación de los picos más externos. El valor del desdoblamiento cuadrupolar QS para este subespectro es de 0,01 mm/s. El espesor del absorbente modifica la intensidad de las líneas de absorción (Chen & Yang, 2007).

En la tabla 1 se indican los parámetros Mössbauer obtenidos del ajuste del espectro del absorbente A2 (láminas).

Tabla 1. Parámetros hiperfinos de las láminas del meteorito Hoba

DI	GA	QS	CH	Fase
A1	Polvo			
0.30(2)	0.30(2)	0.70(2)		$\alpha - \text{Fe}_2\text{O}_3$
0.03(2)	0.20(2)	-0.02(2)	337(2)	Fe-Ni
0.30(2)	0.15(2)	0.02(2)	490(5)	$\alpha - \text{Fe}_2\text{O}_3$
A2	Láminas			
0.32(2)	0.19(2)	0.78(2)		$\alpha - \text{Fe}_2\text{O}_3$
0.02(2)	0.19(2)	0.01(2)	335(2)	Fe-Ni
0.33(2)	0.10(2)	-0.10(2)	490(5)	$\alpha - \text{Fe}_2\text{O}_3$

DI: Desplazamiento Isomérico (mm/s), GA: Medio ancho a media altura (mm/s), QS: Desdoblamiento cuadrupolar (mm/s), CH: Campo hiperfino (kG). Valores de DI respecto al $\alpha - \text{Fe}$ (hierro metálico).

En el espectro de la Fig.4, el doblete y la DCH se pueden atribuir a la coexistencia de las fases antiferro (Fe^{3+}) y ferromagnética débil de la hematita

(α -Fe₂O₃) en pequeñas partículas superparamagnéticas (Vanderergh, 1989). Por otro lado, el subespectro magnético (de seis líneas) es compatible, de acuerdo a los valores del campo hiperfino (335 kG) y del desdoblamiento cuadrupolar (0.01 mm/s)¹, con una aleación Fe-Ni con bajo contenido de Ni, que de acuerdo a los valores de los parámetros Mössbauer corresponde a la fase kamacita propia del meteorito (Stevens et al, 2005). La presencia de la hematita se explica por oxidación de la superficie del meteorito en contacto con la atmósfera y la corteza terrestre.

Del espectro de la Fig.5 puede verse que la contribución de la fase en pequeñas partículas disminuyó considerablemente en relación con la fase magnética. La presencia de la fase superparamagnética se explica por el hecho de que el trozo del meteorito presenta pequeñas fracturas en su interior, hasta donde penetró el oxígeno para formar la hematita, y posiblemente otros óxidos e hidróxidos en pequeñas proporciones no detectadas por esta técnica.

Microscopía electrónica

En la Fig.6 se muestra la imagen de microscopía electrónica, mediante electrones retrodispersados en modo COMPO, tomada a 430X de amplificación de la lámina pulida. Aquí podemos observar dos zonas bien diferenciadas, una zona oscura (zo) y una zona clara (zc).

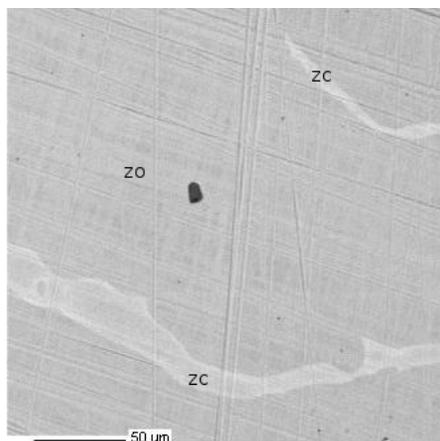


Figura 6. Imagen de microscopía electrónica del meteorito Hoba (lámina pulida) a 430X.

En la figura 7 se representa el mapa de rayos X con relación a la concentración de Fe (distribución

¹ $QS = [(v_6 - v_5) - (v_2 - v_1)]/2$, donde los v_i son las posiciones en velocidad de los picos 1, 2, 5 y 6 del subespectro de 6 líneas, contadas de izquierda a derecha (Abdu, 2004).

elemental del Fe), y en la figura 8 el mapa de rayos X con relación a la concentración de Ni (distribución elemental del Ni), sobre el área de mapeo ya descrita.

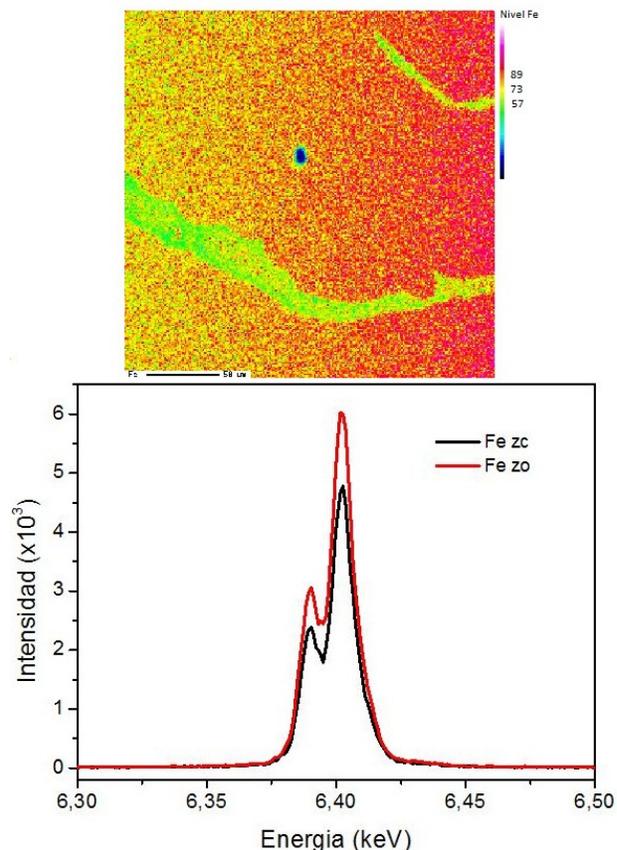


Figura 7. Mapa de rayos x del meteorito Hoba con relación al Fe (arriba) y espectro de rayos X (abajo).

En la parte inferior de las figuras puede verse el espectro WDS de rayos x para cada zona, con relación al Fe y al Ni, respectivamente.

El análisis cualitativo de los espectros WDS indica que la zona oscura contiene mayor proporción de Fe que la zona clara, y la zona clara contiene mayor proporción de Ni que la zona oscura. Esto puede apreciarse igualmente en los mapas de rayos X del área explorada.

Del análisis WDS se obtienen las siguientes concentraciones de Fe y Ni: zona oscura (92,5 % Wt de Fe y 7,5 % Wt de Ni) y zona clara (68,3 % Wt de Fe y 31,7 % Wt de Ni). Esto indica que la zona oscura es pobre en Ni y la zona clara rica en Ni. Estos valores de concentración para el hierro y el níquel están acorde con los reportados en la literatura para las aleaciones Fe-Ni presentes en meteoritos metálicos

(Heide & Wlotzka, 1995; Cook et al; 2006; Campbell & Humayun, 2005). Podríamos decir entonces que la zona oscura es compatible con la presencia de la aleación Fe-Ni llamada kamacita, mientras que la zona clara es compatible con la presencia de la aleación Fe-Ni llamada taenita.

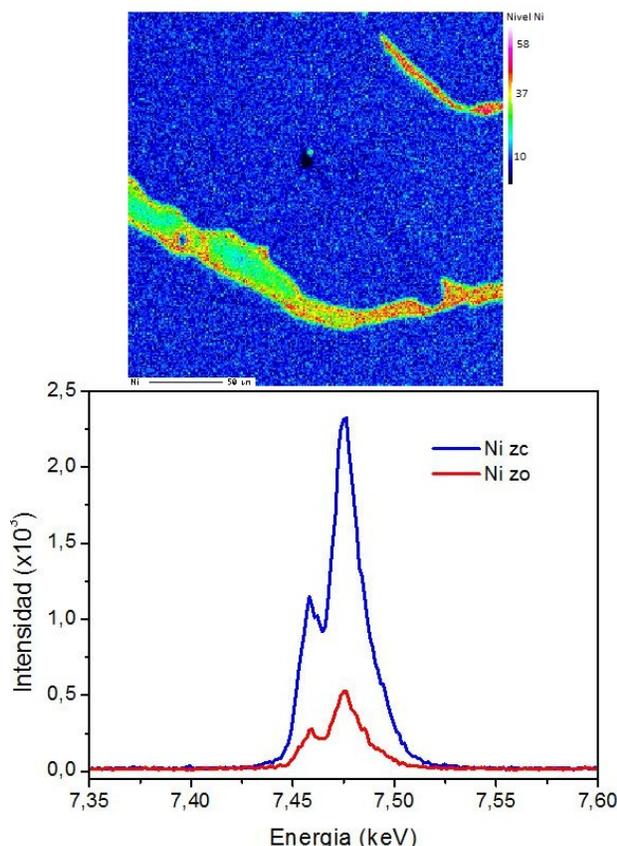


Figura 8. Mapa de rayos X del meteorito Hoba con relación al Ni (arriba) y espectro de rayos X (abajo).

Conclusiones

Los resultados preliminares de espectroscopía Mössbauer, de un fragmento del meteorito Hoba (Grootfontein, Namibia), indican la presencia de la fase hematita en pequeñas partículas superparamagnéticas, y la fase Fe-Ni kamacita, propia del meteorito. Los resultados de la composición química de las dos zonas exploradas por la técnica WDS indican una zona rica en Ni y otra zona pobre en Ni. Las proporciones de Fe y Ni encontradas en ambas zonas, están acorde con las reportadas en la literatura para las aleaciones Fe-Ni taenita y kamacita.

Agradecimientos

Agradecemos la colaboración del Lic. Luís Alberto Errico, del Centro de Microscopía Electrónica de la Facultad de Ciencias de la UCV, por su valioso trabajo en el análisis por microscopía electrónica.

Bibliografía

- Abdu, Y. A. (2004). Mössbauer Spectroscopy of Meteoritic and Synthetic Fe-Ni Alloys. Doctoral Thesis. Faculty of Science and Technology. Uppsala University. Uppsala. Sweden.
- Artemieva, N. A. & Bland, P. A. (2003). The largest meteorites on Earth. *Meteoritics & Planetary Science, Supplement*. 38(7): A84.
- Axon, H. J. & Smith, P. L. (1972). A metallographic study of some iron meteorites of high nickel content. *Mineralogical Magazine*. 38: 736-755.
- Campbell A. J. & Humayun M. (2005) Compositions of group IVB iron meteorites and their parent melt. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 69, 4733-4744.
- Chen, Yi-Long & Yang, De-Ping. (2007). *Mössbauer Effect in Lattice Dynamics. Experimental Techniques and Applications*. WILEY-VCH Verlag GmbH Co. KGaA. Weinheim.
- Cook, D. L., Wadhwa, M., Davis, A. M. & Clayton, R. N. (2006). Heterogeneity of the Hoba IVB Iron Meteorite: Implications for Its Use as an Analytical Standard. 37th Annual Lunar and Planetary Science Conference. League City, Texas. USA.
- Golden, D. C., Ming, D. W. and Zolensky, M. E. (1995). Chemistry and mineralogy of oxidation products on the surface of the Hoba nickel-iron meteorite. *Meteoritics*. 30: 418-422.
- Graham, A. L., Bevan, W. R. & Hutchison, R. (1985). *Catalogue of Meteorites*. British Museum (Natural History). 4th ed. London.
- Heide, F. & Wlotzka, F. (1995). *Meteorites: Messengers from Space*. Springer-Verlag. New York.
- Mason, B. (1962). *Meteorites*. John Wiley and Sons, Inc. New York.
- Remo, J. L. (1977). The Mossbauer Effect in Iron Nickel Meteorites. *Meteoritics*. 12: 347.
- Scorzelli, R. B. (2008). Meteorites: Messengers from the Outer Space. *J. Braz. Chem. Soc*. 19: 226-231.

Spencer, L. J. (1932). Hoba (South-West Africa), the largest known meteorite. *The Mineralogical Magazine*. XXIII (136): 1-19.

Stevens, J. G., Khasanov, A. M., Miller, J. W., Pollak, H. & Li, Z. (Editors). (2005). *Mössbauer Mineral Handbook*. Mössbauer Effect Data Center. The University of North Carolina, North Carolina. USA.

Vandererghe, R. E. (1989). Some aspect concerning the characterization of iron oxides and hydroxides in solis clays. International Conference on Applications of Mössbauer Effect (ICAME). Budapest. Hungary.

Wertheim, G. K. (1964). *Mössbauer Effect: Principles and Applications*. Academic Press Inc. New York.