

00362



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

CARACTERIZACIÓN DE ALGUNOS METEORITOS MEXICANOS POR MEDIO DE ESPECTROSCOPÍA MÖSSBAUER: LA COLECCIÓN DEL INSTITUTO DE GEOLOGÍA DE LA UNAM

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS (FISICA)

PRESENTA

Físico José Luis Álvarez García

Director de tesis

Maestro en Ciencias Raúl W. Gómez González

México, D.F.

1998

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

26 7691



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A María Luisa⁺, quien vivirá siempre en mi memoria.

A Frida y a Güicho, mis más grandes orgullos.

A Andrea, por su amistad y apoyo.

Agradecimientos

Deseo manifestar mi más profundo agradecimiento al grupo Pandora -al cual me honro en pertenecer- por su enorme apoyo para la elaboración de esta tesis. Es una inmejorable oportunidad para expresar el gran aprecio y admiración que siento por Rosalía, Pepe, Vivi, Marilí y Raúl. En particular, quisiera agradecer a Marilí el gran esfuerzo que ha realizado para apoyarme.

Las ideas fundamentales y la dirección de esta tesis se deben al M. en C. Raúl W. Gómez González, aunadas a la ayuda y orientación de la Dra. Vivianne Marquina Fábrega, sin las cuales este trabajo no hubiera sido posible. Así mismo, quiero agradecer al Fís. Manuel Jiménez la ayuda y asesoría para la obtención de los espectros de los meteoritos y al Ing. Carlos Munive por su colaboración. A Sofía Vela y a José Refugio Dorantes les agradezco su asistencia para la tipografía e impresión de este trabajo.

Mi más sincero reconocimiento a los sinodales que revisaron y enriquecieron esta tesis con sus comentarios y correcciones: doctores Manuel Peimbert Sierra, Tatsuo Akachi Miyazaki, Alicia Oliver Gutiérrez, María Elena Villafuerte Castrejón y Héctor Murrieta Sánchez.

Debo agradecer al Museo del Instituto de Geología de la UNAM el préstamo de los meteoritos que forman parte de su colección y que fueron el objeto de este estudio. En particular a los maestros Rodolfo Corona Esquivel, Director saliente, y Luis Espinosa Arrubarrena, su actual Director. También deseo agradecer al maestro Gerardo Sánchez Rubio por su ayuda para la obtención del permiso para el préstamo de los meteoritos. Las gracias también para el señor Guillermo Gutiérrez, Jefe de Servicios del Museo, por su atenta colaboración.

De manera muy especial quisiera expresar mi agradecimiento a Aurora Aldana Herrero, a Miguel Núñez Cabrera y a Marco Antonio Martínez Negrete por la amistad con la que me honran, así como por el apoyo y estímulo que me han brindado.

C o n t e n i d o

Introducción.....	1
-------------------	---

Capítulo uno

Breve historia de la meteorítica, algunos datos sobre los meteoritos y su clasificación.....	3
--	---

Los meteoritos en México.....	6
-------------------------------	---

El cráter Chicxulub.....	11
--------------------------	----

Clasificación de los meteoritos.....	12
--------------------------------------	----

Condritas.....	15
----------------	----

Acondritas.....	16
-----------------	----

Siderolitas.....	17
------------------	----

Meteoritos féreos.....	18
------------------------	----

Tectitas.....	19
---------------	----

Apéndice: ¿Meteorita o meteorito?.....	20
--	----

Uso del término en publicaciones científicas mexicanas.....	22
---	----

Referencias del capítulo uno.....	25
-----------------------------------	----

Capítulo dos

Espectroscopía Mössbauer.....	27
-------------------------------	----

Absorción resonante.....	27
--------------------------	----

Forma de la línea de absorción.....	29
-------------------------------------	----

Isótopos Mössbauer.....	31
-------------------------	----

Interacciones hiperfinas.....	32
-------------------------------	----

Corrimiento isomérico.....	32
----------------------------	----

Interacción cuadripolar eléctrica.....	33
--	----

Interacciones magnéticas.....	35
-------------------------------	----

Interacciones combinadas	37
Diseño experimental	40
Referencias del capítulo dos	43
Capítulo tres	
Análisis Mössbauer de algunos meteoritos mexicanos	45
Grupo I	
Cacaria	47
Catorce	49
Tule	51
Xiquipilco	54
 Muestras lunares	 56
Grupo II	
Bacubirito	57
Charcas	59
Chupaderos	60
Casas Grandes	61
Santiago Papasquiario	62
Morito	63
 Conclusiones	 65
Referencias del capítulo tres	68

Introducción

El presente trabajo tiene como finalidad caracterizar algunos de los meteoritos caídos en territorio mexicano y que forman parte de la colección del Instituto de Geología de la UNAM. Esta caracterización se realiza por medio de la técnica de espectroscopía Mössbauer. En el capítulo uno se hace una presentación que incluye algunos datos de carácter general sobre los meteoritos y una breve historia de la meteorítica, así como una descripción de los inicios y el desarrollo de esta ciencia en México. Se considera también la clasificación de los meteoritos y se incluye, a manera de anexo, un estudio sobre el género del término: ¿meteorita o meteorito? El capítulo dos está dedicado a describir en qué consiste la espectroscopía Mössbauer, sus bases matemáticas, las condiciones en que se dan la absorción y la emisión resonantes, así como las interacciones que ocurren entre el núcleo bajo estudio y las cargas que lo rodean. Finalmente, en este capítulo se hace una descripción del dispositivo experimental y de las características generales de sus componentes. En el capítulo tres se presentan los análisis hechos a los meteoritos. En primer lugar, se dan sus datos generales, como son su clasificación, el lugar donde fueron hallados, etc.; posteriormente se dan sus espectros y sus parámetros Mössbauer y se dan las interpretaciones de estos últimos para cada uno de los meteoritos. Termina este trabajo dando conclusiones con base en todos los resultados obtenidos.

Capítulo uno

Breve historia de la meteorítica, algunos datos sobre los meteoritos y su clasificación

“Meteorito” o “meteorita”, según la acepción del diccionario, designan a cualquiera de los cuerpos sólidos que llegan a la Tierra procedentes de los espacios siderales; en ocasiones se llega a utilizar el término “aerolito”.

En una noche y en un lugar cualquiera de la superficie terrestre se pueden distinguir unos seis meteoritos cada hora, lo que representa unos 10 millones por día en toda la Tierra. Dado que a simple vista se advierten únicamente los más brillantes, se calcula que si se incluyen en el cómputo todos los meteoritos superiores a la décima magnitud en luminosidad, resulta que la Tierra encuentra diariamente un total de 4000 millones de ellos. A pesar de este número tan elevado, se ha estimado que la cantidad de materia que añaden a la Tierra es de sólo una tonelada al día, puesto que la masa de la mayoría de ellos es muy pequeña; se supone también que la cantidad de materia meteórica caída durante la historia geológica de la Tierra es de mil millones de gramos por kilómetro cuadrado, esto es, un kilogramo por metro cuadrado. La altitud media a la que aparecen los meteoritos más brillantes es de 140 km, y aquella a la que desaparecen es de 50 km, teniendo su trayectoria entre ambas capas un valor medio de 300 km. Los meteoritos visibles son más numerosos a medida que la noche avanza, de modo que el promedio por hora correspondiente a las seis de la tarde es la mitad del correspondiente a las seis de la madrugada. Igualmente se advierte que los meteoritos de la primera parte de la noche son más lentos que los de la madrugada. Ambos hechos se explican teniendo en cuenta que en la primeras horas nocturnas y para cualquier región de la superficie terrestre sólo llegan los meteoritos que se mueven en el mismo sentido que la Tierra y que, por lo tanto, la alcanzan desde atrás, mientras que a partir de medianoche los encuentros son con meteoritos que avanzan en sentido contrario [1].

Los meteoritos más rápidos cruzan la atmósfera a una velocidad de 70 km/s, y los más lo hacen a velocidades que en algunos casos son inferiores a 16 km/h. En ciertas noches el número de meteoritos que se observa es muy superior al valor medio (del orden de varios centenares y en ocasiones de millares cada hora) y además parecen irradiar de un mismo punto de la esfera celeste; a esta agrupación de meteoritos se le da el nombre de **enjambre**, y el punto del cual procede se llama **radiante**. A pesar de su gran densidad aparente, los meteoritos que integran un enjambre están separados por distancias generalmente del orden de 120 km, y en los casos extremos, no inferiores a 30 km. Actualmente se sabe

que los enjambres son agrupaciones de meteoritos que giran alrededor del Sol describiendo órbitas muy cercanas y paralelas entre sí; las más de las veces estas órbitas coinciden de modo aproximado con las de algún cometa, y se acepta que los enjambres están constituidos por las partículas que el cometa pierde al desintegrarse en el transcurso de sus traslaciones alrededor del Sol. Estos enjambres pueden coexistir durante muchas traslaciones con el cometa que los origina y acompañarlo durante muchas traslaciones más; sin embargo, las perturbaciones que los planetas ejercen sobre las órbitas de los enjambres acaban por dispersar poco a poco sus componentes y sus residuos constituyen los meteoritos esporádicos. La observación de un determinado enjambre sólo es posible cuando la Tierra corta su órbita, lo cual tiene lugar en una misma fecha cada año. Entre los enjambres actualmente importantes se encuentran los **Leónidas**, que se observan el 15 de noviembre de cada año y que producen una lluvia meteórica excepcionalmente abundante cada 33 años [1].

La mayoría de los meteoritos se desintegran totalmente a su paso por la atmósfera, pero cuando uno de ellos tiene en el espacio libre una masa igual o superior a los 5 kg, parte de él llega hasta la superficie terrestre. Estos meteoritos de gran tamaño pueden llegar aislados o en bandadas y en algunos casos estallan poco antes de llegar a la superficie terrestre, cayendo sobre la misma en forma de lluvia de pequeñas piedras y originando cráteres. Uno de estos cráteres, el Meteor Crater de Arizona, E.U.A., de forma circular, mide 1200 m de diámetro y 175 m de profundidad. En los alrededores del mismo se ha encontrado una gran cantidad de fragmentos de hierro meteórico, y en su interior modificaciones polimorfos de sílice originadas a gran presión por la magnitud del tremendo impacto. En los cráteres originados por caída de meteoritos, rara vez éstos se encuentran bien conservados, sino únicamente fragmentos de los mismos muy alterados.

El paso de los meteoritos por la atmósfera produce efectos acústicos (detonaciones y un gran trueno prolongado final) y luminosos (el fenómeno conocido con el nombre de "meteoro" y una larga estela de polvo blanco originado por la pulverización de la superficie del meteorito).

Las dimensiones de los meteoritos conocidos varían desde algunas décimas de milímetro (polvo atmosférico) a varios centímetros e incluso metros. Se acepta generalmente que el origen de estos grandes meteoritos no es el mismo que el de los enjambres, sino que se trata de los restos de un primitivo planeta, que se desintegró cuando se hallaba en un estadio semejante al de la Tierra en sus primeras épocas. Esta hipótesis es reforzada por el hecho de que la órbita de los grandes meteoritos es muy semejante a la de los asteroides [1].

El interés de la humanidad por los meteoritos data de tiempos remotos, tal como se puede apreciar en diversos testimonios de las lluvias meteóricas y del hallazgo de esos extraños objetos legados por las antiguas culturas de China, Egipto, Grecia y Roma. Antiguamente se habían dado numerosas interpretaciones sobre su origen. Una de las más admitidas era la de Aristóteles, quien sostenía que los meteoritos eran cuerpos sólidos formados en la superficie terrestre que habían sido proyectados al cielo por el viento, por una erupción volcánica, etc., y posteriormente habían vuelto a caer sobre la tierra. Avicena (hacia el año 1000) pretendía que los meteoritos se formaban en los niveles superiores de la atmósfera. El inesperado arribo de un meteorito implicaba un desafío frontal a los preceptos que impregnaron a la ciencia y que presuponían un orden cósmico estricto.

Durante la segunda mitad del siglo XVIII algunos acontecimientos de relevancia derivaron en el afianzamiento del origen cósmico de los meteoritos. En 1768 una comisión de la Academia Científica de Francia, entre cuyos miembros se encontraba Antoine Laurent de Lavoisier (1743-1794), fue enviada para dictaminar con referencia a la caída de un meteorito, precedida de detonaciones, ocurrida en Lucé; pero la comisión dictaminó que la roca era una variedad de piritita terrestre [2]. En 1794 el prusiano Ernst Florens Friedrich Chladni (1756-1827) fue el primero que difundió la realidad del fenómeno con una publicación que realizó en ese año, desmintiendo la concepción de que los volcanes terrestres, o lunares, eran los responsables de la caída de los meteoritos. Sus observaciones se basaron en el meteorito mixto Krasnajarsk, hallado en Siberia en 1749, y en el meteorito férrico Otumpa, perteneciente a la lluvia meteórica de Campo del Cielo, de Chaco, Argentina. Chladni dedujo que ambas masas habían sido proyectadas desde una fuente distante y concluyó que su origen era cósmico; pero la historia de la meteorítica da a conocer a Chladni como un individuo poco afortunado, dado que una lluvia meteórica tuvo lugar el mismo año pocas horas después de la erupción del Vesubio. ¿Quién dudaría que la piedras que Chladni afirmaba que provenían del espacio exterior habían sido eyectadas por el enfurecido volcán? Es así como esa coincidencia desafortunada dio suficientes argumentos a sus detractores para negar y ridiculizar la teoría que había propuesto. Sin embargo, los hechos posteriores demostrarían lo contrario.

En abril de 1803, en L'Aigle, Francia, después de la aparición de una "bola de fuego", seguida de detonaciones, se precipitaron a tierra entre 2000 y 3000 piedras. Tan extraordinario acontecimiento fue reportado por el francés Jean Baptiste Biot (1774 -1862), quien estableció, ya sin lugar a dudas, que los meteoritos provenían del espacio exterior [2].

Así, Chladni y Biot comparten el honor de ser los pioneros en el establecimiento de la teoría sobre el origen cósmico de los meteoritos. Luego que se hubo comprendido este aspecto, se despertó un gran interés por esos inesperados visitantes cósmicos y su estudio tomó las características de una ciencia verdadera, actualmente denominada meteorítica, donde confluyen aspectos geológicos, astronómicos, físicos y químicos y cuya relevancia radica en ayudar a establecer el origen del planeta Tierra y del Universo.

La consideración de los meteoritos como materia extraterrestre no fue universalmente admitida sino hasta el siglo XIX. Al comprender su procedencia, muchos científicos se sintieron atraídos a estudiar la naturaleza de los meteoritos y es así como la ciencia decimonónica comienza a ocuparse de ellos y nace la meteorítica como una disciplina científica, nutriéndose de otras ciencias ya plenamente establecidas.

Los meteoritos en México

Durante el siglo XIX los meteoritos **hallados u observados caer** en el país adquirieron gran importancia con la consolidación de la meteorítica como disciplina científica. El abundante material meteorítico mexicano se integró a numerosas colecciones extranjeras y pocas mexicanas, permitiendo investigaciones desde diversos puntos de vista que llevaron a la comprensión de la variada naturaleza de estos materiales extraterrestres. En esta época aparecen personajes como el barón Alexander von Humboldt, quien tempranamente se interesó por los meteoritos del país, en el momento en que comenzaban a integrarse las primeras colecciones de minerales y rocas, en el recientemente creado Real Seminario de Minería, institución que ejerció gran influencia en el desarrollo científico de la nación.

La observación de la caída de un meteorito siempre fue un hecho fantástico. Difícilmente los habitantes de Pueblito de Allende, en Chihuahua, podrán olvidar la madrugada del 8 de febrero de 1969, cuando se precipitaron a tierra miles de pedruscos después de que un bólido de colores brillantes cruzara el cielo nocturno. Pero, para las antiguas comunidades, al no comprender cabalmente el fenómeno, el hecho seguramente tuvo una influencia particular en su religión y cultura. Tal como en Pueblito de Allende, la observación de una lluvia meteórica debe haber sido un acontecimiento transmitido de generación en generación. Si alguna de esas comunidades antiguas lograba rescatar algún meteorito, lo veneraban porque habían observado, mas no entendido, su celestial procedencia, de allí donde provenía la luz del Sol y la lluvia bienhechora que regulaba sus cosechas, sus cacerías y la vida toda.

El hallazgo de una gran masa de hierro metálico, insólita en el terreno, si bien menos espectacular que la observación de una lluvia meteórica, no dejaba de tener grandes consecuencias, y así el hombre, siempre con la intención de aprovecharse del entorno natural para su beneficio y bienestar, comenzó a utilizar ese hierro; haciéndolo así por centurias, dado que su uso no implicaba las laboriosas técnicas de extracción del metal de los variados minerales contenidos en yacimientos difíciles de aprovechar. Lo anterior es la causa por la cual no se han hallado grandes meteoritos de hierro en Europa, donde fueron convertidos en objetos, a diferencia de América y Australia, que brindaron fabulosos hallazgos de inmensas masas antes y durante el siglo XIX, las que escaparon de ser convertidas en utensilios debido a que las comunidades indígenas locales no habían descubierto el uso del hierro y a que los territorios eran demasiado extensos y prácticamente inhabitados.

Es de esta manera como diversas comunidades primitivas utilizaron el hierro meteórico y, para mencionar algún ejemplo, es muy conocido el caso de las tribus esquimales que elaboraron diversos implementos con el gran hierro meteórico de Cape York, Groenlandia. Y no es necesario acudir a latitudes tan lejanas para ejemplificar el caso, dado que los habitantes del Valle de Toluca utilizaron durante mucho tiempo el hierro del meteorito Xiquipilco para elaborar rejas para sus arados, entre otros objetos de utilidad en su vida cotidiana.

Es en el año de 1803, a poco más de una década de la fundación del Real Seminario de Minería, cuando la ciencia novohispana tomó un impulso muy particular debido a la visita del naturalista Alexander von Humboldt (1769-1859). Y es ese mismo año cuando Biot, en Francia, dejó perfectamente establecido el origen de los meteoritos. Humboldt se interesó por las plantas, los animales, las rocas y demás objetos naturales propios del territorio de la Nueva España, incluyendo los meteoritos, de los cuales ya se disponía de muchas noticias en el Real Seminario de Minería, la institución creada por la Corona Española para vigorizar la decadente minería de su colonia americana más próspera y que tuvo gran influencia en el desarrollo científico del México independiente que surgió poco después [2].

El barón tenía gran interés por los raros meteoritos. Al iniciar su viaje por América, observó una lluvia de estrellas en Cumaná, actual territorio de Venezuela, cuya detallada descripción indica la importancia que Humboldt daba a este tipo de fenómenos. Aunque es posible que el acontecimiento de L'Aigle y la publicación de Biot no hayan sido de su conocimiento, Humboldt estableció una relación clara y directa entre la lluvia de estrellas observada en Cumaná y la caída a tierra de meteoritos.

Con la creación del Real Seminario de Minería, en 1792, se comenzarían a integrar las primeras colecciones de minerales y rocas, incluyendo los meteoritos conocidos del territorio de la Nueva España. Fausto Delhuyar, primer director de esa institución, y condiscípulo de Humboldt en las clases del profesor A. G. Werner (1750-1817) en la célebre Escuela de Minas de Freiberg, en Sajonia, le brindó la información de los meteoritos conocidos de la Colonia y le suministró fragmentos del meteorito denominado Durango, que fue uno de los primeros que el sabio llevó para enriquecer las colecciones de Europa. Humboldt, en su famoso *Ensayo Político* publicado en 1811, mencionó los meteoritos que ya habían llamado mucho la atención en esa época: Zacatecas, Charcas, Durango y Toluca [2].

También se debe a Humboldt las referencias del meteorito Cholula, del cual indicó que “tenía forma de sapo” y que fue observado por “los compañeros de Hernán Cortés que vieron en Cholula un meteorito incandescente que venía de la nubes y cayó en la Pirámide” [3]. Pero del Cholula, posiblemente de naturaleza pétreo, se desconoce su paradero actual.

Respecto al meteorito Durango, Humboldt se mostró enormemente interesado, y aunque existe y existió confusión respecto a su plena identificación y paradero, el interés mostrado por el sabio prusiano ejerció una gran influencia en el estudio de los meteoritos en la época. Otro de los grandes meteoritos mexicanos con los que Humboldt estuvo involucrado fue el de Yanhuatlán, del cual obtuvo un fragmento de alrededor de 100 g que fue enviado al Museo de Viena, una de las grandes colecciones de meteoritos del mundo que Humboldt ayudó a integrar. Este meteorito, también fue utilizado como yunque por algún tiempo.

Algunos de los grandes meteoritos metálicos de México, entre los que se destacan Chupaderos, Morito y Zacatecas, fueron conocidos seguramente por las antiguas culturas indígenas, y en ellos se realizaron las primeras investigaciones a principios del siglo XIX, en los albores de la meteorítica. También los fragmentos del meteorito Toluca fueron conocidos mucho antes del siglo XIX por los habitantes de ese lugar y fue utilizado por los indígenas para elaborar diversos implementos útiles, en tanto que numerosos coleccionistas y científicos recolectaron material que enriquecieron las colecciones de todo el mundo, lo que hizo que los fragmentos de esta lluvia meteórica constituyeran, hasta la caída del meteorito Allende en 1969, el más representado de México en todas las colecciones importantes del mundo.

Los tres bloques pertenecientes a la lluvia meteórica de Chupaderos (Chupaderos I de 14 tons., Chupaderos II de 6.8 tons., Adargas o Concepción de 3.4 tons.) y el meteorito independiente Morito, fueron hallados cerca del antiguo

poblado de Huejuquilla, en las inmediaciones de Jiménez, Chihuahua. A pesar de que estos hierros meteóricos eran conocidos por la población local desde mucho tiempo atrás, la primera noticia escrita proviene de Bartlett, que en 1848 inspeccionó la nueva frontera entre México y Estados Unidos en relación con el Tratado de Guadalupe Hidalgo [4]. Estas inmensas masas de hierro también fueron mencionadas por varios geólogos importantes de la época. La descripción de la localidad fue dada por Antonio del Castillo en el primer catálogo de meteoritos mexicanos, escrito en francés, donde presentó un mapa esquemático de la localidad de los hallazgos [5]. Las masas no fueron, aparentemente, movidas del sitio en que cayeron, hasta que por iniciativa del propio del Castillo, entonces Director de la Escuela Nacional de Ingenieros y del Instituto Geológico de México, fueron transportadas por ferrocarril a la Ciudad de México en 1893, para ser exhibidas en el pórtico del Palacio de Minería. Cabe mencionar que el más grande de los Chupaderos fue solicitado en 1989 por el gobierno de Japón para la exposición realizada en Yokohama.

Otro de los grandes meteoritos que está en el Palacio de Minería es el denominado Morito o San Gregorio, que pesa poco más de diez toneladas. Fue reconocido por siglos como una marca en el camino de las rutas indígenas hacia el sur, alrededor de 25 km al noreste de Hidalgo del Parral, al noroeste del sitio del hallazgo del Concepción. La masa fue mencionada primero en la *Historia de Felipe II* por Luis Cabrera de Córdoba en 1619 [6]. Alrededor del año 1600 fue parcialmente excavado y un herrero logró extraerle algunos fragmentos, en la época en que había gran actividad minera en la región debido a que la mina Santa Bárbara, situada alrededor de 35 km en dirección sudoeste, comenzó sus operaciones en 1547. Los estudios mineralógicos posteriores confirmaron que el Morito y los Chupaderos, incluyendo al Concepción, pertenecen a caídas diferentes. La lluvia meteórica ocurrida en Pueblito de Allende, en 1969, trajo nuevamente la atención al área cuando cayeron más de 2000 kg de fragmentos de un raro tipo de condrita.

Los ricos yacimientos argentíferos de la ciudad de Zacatecas fueron explotados por los españoles inmediatamente después de la Conquista y, probablemente, el meteorito Zacatecas fue hallado durante la prospección de plata, poco después del arribo de los conquistadores a la zona, en la segunda década del siglo XVI. Del meteorito Zacatecas, originalmente situado al oeste de la ciudad homónima, se extrajeron muestras que fueron enviadas a las colecciones europeas. Algunos de los especímenes se encuentran actualmente en la Geological Society de Londres. Aparentemente la masa principal del Zacatecas fue transportada a la Ciudad de México por iniciativa de Antonio del

Castillo en 1890, tres años antes que los meteoritos del grupo Huejuquilla y Morito corrieran igual suerte.

La lluvia meteórica ocurrida cerca de Toluca comprende muchos miles de fragmentos que fueron recuperados en un área pequeña en los alrededores de Xiquipilco, situado a 25 km al nornoroeste de aquella ciudad. La primera mención escrita es de la *Gazeta de México* de 1784 y fue uno de los meteoritos mencionados por Chladni [7]. Los nativos de Xiquipilco buscaban fragmentos de hierro expuestos después de cada estación de lluvia y los forjaban en implementos agrícolas, de tal forma que todo el hierro utilizado en la región provenía de esta fuente. Al respecto se señala que los dueños de las haciendas de Indege y Santa Isabel adquirían el material a los indios y lo utilizaban para elaborar diversos utensilios. Aún hoy se siguen hallando fragmentos de hierro provenientes de esta lluvia meteórica, los que son vendidos con otros que no son meteoritos en el mercado del pueblo de Xiquipilco del estado de México.

El año de 1804 fue pródigo en noticias de meteoritos que, seguramente, ya eran conocidos anteriormente, pero sin referencias escritas. El meteorito Charcas era conocido desde hacía mucho tiempo, pero la primera referencia es de Sonneschmidt [8]. El meteorito Bacubirito fue reportado como descubierto en el estado de Sinaloa, al sur del viejo poblado minero de Bacubirito [9,5]. Hasta el reporte de Angermann en 1903 [10], que indicó que fue descubierto en 1863 y le estimó un peso de 25 toneladas, sólo se disponía de descripciones incompletas y de pocos fragmentos para estudio. Este gran meteorito fue desenterrado y estudiado recientemente a principios de este siglo por Ward (1902) [11], que le estimó un peso de 50 tons., próximo al meteorito de Cape York, pero posteriormente se comprobó que su peso es de aproximadamente la mitad, aunque el ejemplar, que fue trasladado en 1959 al Parque Cívico de Culiacán, Sinaloa, nunca fue pesado.

La primera información del meteorito Casas Grandes, de 1545 kg, la dio E. G. Tarayre en 1867 [12], también involucrado con el meteorito Durango, quien reportó el hallazgo en una de las cámaras mortuorias de las ruinas del poblado Moctezuma. El hierro meteórico se encontró envuelto en género tejido elaborado de la fibra de maguey, de manera similar a la mortaja de las momias halladas en este sitio. Fue transportado por tren y barco a Filadelfia, donde fue exhibido en la Feria Mundial de 1876 entre los minerales de México y posteriormente fue donado al Instituto Smithsonian ese mismo año [6].

Otro meteorito utilizado como yunque por varios años fue el de Cacaria, de algo más de 41 kg, hallado en la hacienda del mismo nombre situada a 50 km al sur de Durango, hasta que fue llevado al Museo del Chopo. El meteorito Moctezuma, de 1.7 kg, fue hallado en la Sierra de la Madera, a 12 km

al noreste de Moctezuma, Sonora [13]. El meteorito de Santiago Papasquiaro, Durango, de 130 kg, fue hallado en 1958.

El cráter Chicxulub

Una de las controversias que más polémica ha causado desde que los fósiles dejaron de ser considerados como meros “caprichos de la naturaleza”, fue la causa de la extinción de los dinosaurios en tierra y de los amonites en el mar a finales del periodo cretácico, hace aproximadamente 65 millones de años. La disputa tomó inusitados bríos cuando en 1980 Luis y Walter Alvarez, de la Universidad de California, en Berkeley, propusieron que esa extinción masiva de organismos fue desencadenada por el choque de un meteorito con la Tierra. Un gran paradigma que sólo convencería a los escépticos de la comunidad científica si se dieran datos concretos de la ubicación del cráter producido por el tremendo impacto.

Chicxulub es el nombre maya que significa “cola del diablo” de un poblado situado al norte de Yucatán. Muchos jamás se hubieran enterado de su existencia, sobre todo teniendo en cuenta su nombre impronunciable, si los geólogos Antonio Camargo y Glen Penfield no hubieran presentado en una reunión científica en Houston la hipótesis de la existencia de un cráter sepultado, de algo así como 180 kilómetros de diámetro cuyo centro es esa población de nombre raro. La hipótesis, presentada un año después que los Alvarez pusieran en guardia a la comunidad científica internacional, fue sustentada en las anomalías geofísicas detectadas durante la prospección de hidrocarburos en la costa norte de la península de Yucatán [14]. El cráter propuesto por los geólogos venía como anillo al dedo para sustentar la teoría de los Alvarez y justificar la extinción masiva en el límite entre el cretácico y el terciario, hace 65 millones de años.

La hipótesis de Camargo y Penfield cayó en el olvido hasta que, en 1991, Alan Hildebrand, de la Universidad de Arizona, encontró una secuencia sedimentaria caótica que interpretó como el producto de una ola gigantesca, de las que afectan a las costas de Hawai cuando se producen fuertes sismos en zonas submarinas, llamadas **tsunamis**. Esta secuencia llevó a Hildebrand a proponer que el gran impacto había tenido lugar en el Mar Caribe y se dedicaron a buscar evidencias en el mismo, enterándose de la propuesta de Camargo y Penfield una década después de que fuera formulada.

Así, la zona de Chicxulub, cubierta totalmente por las aguas hace 65 millones de años, tomó gran importancia como firme candidato para ser la zona del gran impacto. Nuevas evidencias surgieron cuando un grupo de investigadores, del que formaba parte el científico mexicano Luis Marín,

encontró, analizando imágenes de satélite, que los cenotes formaban un hemiciclo interrumpido por el mar, lo que se interpretó como producto de la filtración de agua subterránea a través de las rocas fracturadas en la orilla del supuesto cráter. Así, los datos actuales llevaron al geólogo planetario Robert Dietz, que hace más de tres décadas propuso el término “astroblema” para referirse a las cicatrices antiguas en la superficie terrestre producidas por impactos cósmicos, a considerar a Chicxulub, la “cola del diablo”, como el lugar más factible para el gran impacto que modificó el curso de la vida sobre el planeta Tierra.

Clasificación de los meteoritos

Comúnmente, el propósito de una clasificación de objetos es agruparlos y relacionarlos entre sí, con la intención de ordenarlos, facilitando investigaciones de tipo comparativo. Toda clasificación debiera consistir del menor número de grupos posibles formados con esos objetos, sin forzar la agrupación de ellos cuando la evidencia de su relación no es absolutamente clara. La subdivisión de grupos en subgrupos se justifica cuando la información de los objetos individuales así lo permite, sin embargo, de acuerdo a las características que se estén considerando, y en términos generales, no es posible eliminar la ocasional colocación de objetos potencialmente relacionados en grupos separados, lo que debilita la utilidad de esa clasificación.

La primera observación que se realiza en un meteorito, si tenemos la certeza de que lo sea, es si es de naturaleza pétreo o metálica, por lo que de manera general y coloquial se utilizan estos términos para designarlas.

Los meteoritos se han clasificado desde distintos puntos de vista. Una clasificación sencilla considera si el objeto ha sido observado caer o se halló, para lo cual en inglés se han acuñado los términos “falls” y “finds”, respectivamente, mientras que en idioma castellano no se han definido las expresiones correspondientes, pero se pueden utilizar los términos “caída observada” y “hallado”. Para dar un ejemplo, al primer tipo corresponde el meteorito Allende, observado caer en la madrugada del 8 de febrero de 1969, cerca del poblado Pueblito de Allende, en el estado de Chihuahua, México, mientras que al segundo tipo pertenecen muchos meteoritos féreos mexicanos, como los pertenecientes a la lluvia meteórica de Toluca, cuyos ejemplares se siguen encontrando en los alrededores del pueblo de Xiquipilco, en el estado de México, y los grandes ejemplares de los meteoritos Chupaderos, Morito y Zacatecas que se exhiben en el Palacio de Minería de la Ciudad de México.

En la clasificación de los meteoritos, tal como en la de las rocas y minerales, la terminología utilizada (grupos, tipos, clases) no ha sido unificada

por los distintos autores, de tal forma que esos términos pueden tener diferente significado y connotación en uno u otro trabajo.

El esquema de clasificación más conocido para los meteoritos es el de Mason [15,16], el cual se basa en el de Prior [17]. Aquel autor considera los cuatro grupos aceptados para los meteoritos: **condritas, acondritas, siderolitas y férreos**; división realizada con base en su composición químico-mineralógica y estructura, en los cuales están comprendidas las distintas clases o tipos.

La clasificación de Mason incluye algunos tipos que sólo están representados por muy pocos meteoritos, por ejemplo el siderófito Steinbach es el único conocido, mientras que deja a otros meteoritos únicos, por ejemplo el férreo Soroti, completamente fuera del sistema de clasificación. Una entrada por separado para cada objeto que no entra en la clasificación es, en principio, una solución al problema, pero el número de tales objetos es tan grande (sólo en los meteoritos férreos se conocen unos 50 casos) que hace que queden mejor agrupados en una amplia categoría de anómalos dentro de la clasificación general, la cual agrupa meteoritos sin ninguna relación entre sí.

En la siguiente tabla está la clasificación de los meteoritos:

I. Condritas

- A. De enstatita.
- B. De olivino-broncita.
- C. De olivino-hipersteno.
- D. Carbonosas.

II. Acondritas

A. Pobres en Ca

1. Aubritas (acondritas de enstatita).
2. Diogenitas (acondritas de hipersteno).
3. Ureilitas (acondritas de olivino-pigeonita).
4. Chassignitas (acondritas de olivino).

B. Ricas en Ca

1. Angritas (acondritas de augita).
2. Nakhilitas (acondritas de diópsido-olivino).
3. Eucritas (acondritas de pigeonita-plagioclasa cálcica).
4. Howarditas (acondritas de ortopiroxeno-plagioclasa cálcica).

III. Siderolitas

- A. Palasitas (siderolitas de olivino).
- B. Siderófiros (intermedias de broncita-tridimita).
- C. Lodranitas (intermedias de broncita-olivino).
- D. Mesosideritas (intermedias de piroxeno-plagioclasa).

IV. Férrreas

A. Hexaedritas

B. Octaedritas

1. Muy gruesas.
2. Gruesas.
3. Medias.
4. Finas.
5. Muy finas.

C. Ataxitas ricas en Ni.

En los cuatro grupos de Mason se separan algunos tipos para los cuales hay ciertas evidencias de relación genética, mientras que se agrupan otros que están poco relacionados, lo cual es un problema no resuelto en la clasificación de los meteoritos. Por ejemplo, las acondritas de enstatita (aubritas) y las howarditas muestran poca evidencia de relación genética, a pesar de pertenecer al mismo grupo (el de las acondritas), mientras que las evidencias sugieren una relación genética entre las howarditas (pertenecientes al grupo de las acondritas) y las mesosideritas (del grupo de siderolitas). Es de mencionar que las evidencias indican que las condritas de enstatita, las aubritas, la siderolita Mount Egerton y el meteorito férreo anómalo Horse Creek están muy relacionados [18]. Por otro lado, hay numerosos ejemplos de meteoritos, especialmente mesosideritas y meteoritos férrreos con inclusiones de silicatos, que no entran fácilmente en alguno de los cuatro grandes grupos considerados por Mason.

La solución a los problemas de clasificación indicados, parece ser, más que eliminar las cuatro grandes categorías de la clasificación básica de los meteoritos, adicionar un tipo de anómalos en cada grupo, una solución poco elegante pero útil desde el punto de vista práctico.

Se consideran dos principios básicos para incluir un meteorito no clasificado en un grupo particular: 1) Los meteoritos pertenecientes al mismo grupo deben ser muy similares en composición química, lo que se comprueba en la graficación de los parámetros composicionales que en cada uno de los cuatro grupos son particulares. Aunque tales comparaciones pueden ser hechas a partir de análisis de roca total, una prueba más rigurosa es la comparación de la composición de fases mineralógicas individuales. 2) Los meteoritos cercanamente relacionados deben tener estructuras similares, hasta donde lo permita la composición total y en tanto que las características estructurales originales no hayan sido alteradas por procesos posteriores, tales como eventos de choque, metamorfismo o modificaciones antrópicas. La estructura de los meteoritos es un reflejo de su composición y de la historia termodinámica durante su formación, factores probablemente similares para meteoritos pertenecientes a un mismo grupo.

A continuación se describen individualmente cada uno de los grupos de la clasificación de Mason.

Condritas

Alrededor del 80% de los meteoritos cuya caída ha sido observada pertenecen al grupo de las condritas, nombre asignado por el hecho de que contienen cantidades variables de cóndrulos. Estas estructuras conforman cuerpos de forma esferoidal o elipsoidal, que miden desde décimas de milímetro, visibles con el microscopio petrográfico, hasta varios milímetros de diámetro, observables a simple vista. La composición mineralógica de los cóndrulos es esencialmente la misma que la de la matriz que los incluye. Estos cóndrulos, siempre ausentes en rocas terrestres, llegan a constituir hasta el 70% del volumen total de las condritas y es una característica única y distintiva de este grupo de meteoritos. Se conoce un buen número de meteoritos sin cóndrulos, cuyo contenido de elementos no volátiles es muy similar al de las condritas, por lo que también ellos se incluyen en este grupo.

Las proporciones relativas de elementos no volátiles en las condritas son marcadamente similares a las de la atmósfera solar y estrellas similares al Sol, lo que llevó a considerar su semejanza con el material primitivo indiferenciado a partir del cual se formó el Sistema Solar. Lo anterior hace que los meteoritos de este grupo sean considerados como **no diferenciados**, mientras que todos los otros sean referidos como **diferenciados**. Obviamente, esta diferenciación es de naturaleza muy distinta a la experimentada por las rocas ígneas terrestres. Por otro lado, el término “acondrita”, en sentido restringido debiera ser aplicado a todas las clases de meteoritos diferenciados,

aunque, de hecho, está restringido a los diferenciados que contienen cantidades pequeñas (iguales o menores al 1%) de material reducido.

Las condritas se clasifican por su composición mineralógica, especialmente por el tipo de piroxeno predominante:

Condritas de enstatita. Estas condritas están constituidas casi por MgSiO_3 puro; las inclusiones metálicas pueden ser abundantes y usualmente tienen bajo contenido de Ni.

Condritas de olivino-broncita. Estas condritas contienen aproximadamente iguales proporciones de olivino (silicato de magnesio y hierro de color verde oliva) que del piroxeno broncita $[(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3]$; son más abundantes que las de enstatita.

Condritas de olivino-hipersteno. Estas condritas son las más abundantes y generalmente contienen más olivino que piroxeno; el hipersteno contiene desde 12 a 20% de Fe, lo cual le confiere una coloración más oscura que la de las condritas de olivino-broncita. Los granos metálicos contienen desde 7 hasta 12% de Ni.

Condritas carbonosas. Estas condritas poseen color oscuro debido a su contenido de C que se presenta en forma de compuestos complejos; a diferencia de otros meteoritos, contienen considerable proporción de agua. Esta clase fue dividida por Wilk [19] en los tipos I, II y III, considerando la abundancia relativa de carbono, agua y azufre y el peso específico. Estos tipos poseen características químicas y mineralógicas definidas, lo cual no descarta la existencia de meteoritos con una composición intermedia. El último tipo, fue denominado originalmente condrita de olivino-pigeonita $[(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3\text{-CaMg}(\text{SiO}_3)_2]$, pero estudios mineralógicos determinaron que el piroxeno es realmente clinobroncita-clinohipersteno $[(\text{Fe,Mg})\text{SiO}_3]$, y fueron colocados dentro de las condritas carbonosas.

Acondritas

Las acondritas son los meteoritos más parecidos a las rocas terrestres, como dunitas y basaltos; no presentan cóndrulos y tienen bajo contenido de Ni y Fe y texturas más gruesas que las condritas, estructura brechada, pero pocas con textura tan definida como las de las rocas ígneas.

Los principales minerales de las acondritas son piroxenos, plagioclasas y olivino; en concentraciones menores se encuentra kamacita, taenita (hierro con níquel en diferentes proporciones), troilita (FeS), schreibersita (fosfuro de hierro-níquel), cromita (FeOCr_2O_3), magnetita (Fe_3O_4)

y cristobalita. Usualmente contienen menos olivino que las condritas y sus feldespatos son más cálcicos.

Se distinguen dos tipos de acondritas, uno pobre en Ca (aubritas, diogenitas, chassignitas y ureilitas) y otro rico en ese elemento (angritas, nakhlitas, howarditas y eucritas):

Aubritas. Acondritas que contienen $MgSiO_2$ casi puro y poseen cantidades menores de minerales accesorios.

Diogenitas. Acondritas con hipersteno, cantidades pequeñas de Ni-Fe y otros minerales accesorios.

Chassignitas. Representadas por sólo un ejemplar conocido, consistente casi por entero de olivino.

Ureilitas. Acondritas que contienen grafito y ocasionalmente pequeños diamantes; metal bajo en Ni.

Angritas. Condritas consistentes principalmente de augita titanífera (más del 90%) con poco olivino y troilita.

Nakhlitas. Acondritas que consisten de un agregado holocristalino de diópsido (75%) y olivino.

Howarditas. Acondritas compuestas de ortopiroxeno (comúnmente hipersteno) y plagioclasa cálcica; el contenido de Fe y Ca es menor que el de las eucritas.

Eucritas. Acondritas compuestas de plagioclasa y pigeonita.

Siderolitas

Las siderolitas son meteoritos relativamente raros que contienen proporciones en peso aproximadamente iguales entre la fase metálica y los silicatos básicos (olivino y piroxeno). Se subdividen en los siguientes grupos:

Palasitas. Son los meteoritos más abundantes de este grupo; consisten de cristales grandes de olivino embebidos en una matriz de Ni-Fe. El hierro se presenta como kamacita y taenita en intercrecimiento tipo Widmanstätten; el olivino se presenta en cristales grandes, redondeados y en ocasiones angulosos, acompañados por cobre, troilita y schreibersita en cantidades pequeñas.

Siderófiros. Con un único ejemplar conocido, el meteorito Steinbach, que contiene cristales de broncita y tridimita (SiO_2) en una red de Ni-Fe.

Lodranita. Con un único ejemplar conocido, el meteorito Lodran, que consiste de broncita y olivino en una malla de Ni-Fe.

Mesosideritas. Meteoritos con estructura muy diferente a la de las palasitas; la fase metálica suele estar finamente diseminada, aunque en ocasiones forma

sectores grandes; la textura es frecuentemente cataclástica y el olivino presenta una gama de composiciones más amplia que en las palasitas.

Meteoritos férreos

Los meteoritos férreos, también denominados sideritos, están compuestos casi exclusivamente de metal, principalmente Fe con concentraciones menores de Ni, que varía desde 5.3 hasta 26%; también se encuentran presentes, como elementos traza, Co, Ga, Ge, As, Ru, Sb, Re, Os, Ir, Pt y Au [20,21]. Los meteoritos férreos pueden contener pequeñas cantidades de carburos, fosfuros, grafito, silicatos, daubreelita (FeSCrS_3), troilita (FeS) y cohenita $[(\text{Fe},\text{Ni},\text{Co})_3\text{C}]$ [22]. Su clasificación en tres tipos se hace fundamentalmente de acuerdo a su estructura primaria, donde el tamaño y forma de los cristales de kamacita son un criterio decisivo: en las hexaedritas los cristales de kamacita son generalmente tan grandes como el espécimen y equiaxiales; en las octaedritas se distinguen a simple vista como láminas, mientras que las ataxitas no presentan kamacita visible al ojo desnudo [23].

Las estructuras utilizadas para la clasificación de los meteoritos férreos se hacen aparentes cuando se pule una superficie del meteorito; sin embargo, pueden ser mejor observadas después de que la superficie pulida es atacada con nitol (HNO_3 al 3% en etanol), un reactivo químico que ataca diferencialmente las dos fases de Ni-Fe. El patrón revelado depende de la proporción de Ni presente y de la tasa de enfriamiento a la cual fue sometido el metal durante su ingreso a la atmósfera. Cuando el contenido de Ni es menor al 6% la fase de Ni-Fe predominante es la kamacita; sin embargo, algo de la fase rica en Ni, taenita ($\gamma\text{-Fe}$), se puede formar en las aristas de los granos de kamacita. Al incrementarse el contenido de Ni se forma más taenita y el ancho de las láminas de kamacita disminuye. Los cristales de taenita a temperatura baja no están en la concentración de equilibrio del Ni, por lo que el interior de los cristales se transforma en una mezcla de grano muy fino constituida por taenita y kamacita, a la que se le llama plessita y se encuentra en las composiciones transicionales entre octaedritas y ataxitas:

Hexaedritas. Son el tipo más simple de meteoritos que consisten de una fase de Ni-Fe (kamacita o $\alpha\text{-Fe}$); frecuentemente contienen minerales accesorios y muestran usualmente líneas de Neumann; el contenido de Ni varía entre 5 y 6.5%.

Octaedritas. Contienen desde 6.5 hasta 16% de Ni; poseen dos fases de Ni-Fe (kamacita y taenita) y se clasifican de acuerdo al ancho de las bandas de

kamacita en muy gruesas, gruesas, medias, finas y muy finas, no existiendo una distinción precisa entre estos subtipos y entre las octaedritas y hexaedritas.

Ataxitas. Grupo de meteoritos metálicos generalmente de grano fino, a diferencia de los otros tipos de meteoritos féreos; algunas presentan un porcentaje de Ni similar a las hexaedritas, mientras que otras contienen ese metal en concentración superior a las octaedritas; las ataxitas con alto contenido de Ni usualmente presentan inclusiones abundantes de schreibersita.

Tectitas

Mención especial merecen las **tecticas**, que son pequeños fragmentos de material vítreo, de aspecto que recuerda a la obsidiana. Existe controversia en cuanto a su origen; por su composición química no han podido ser clasificadas como material de origen terrestre y las evidencias hasta hoy encontradas tampoco permiten considerarlas como meteoritos. Taylor [24] presentó información tendiente a considerar a las tecticas como productos de impactos meteoríticos o cometarios. Las tectitas se han hallado en pocas regiones de la superficie terrestre, pero no se sabe de ejemplares identificados en el territorio de México. De un total aproximado de 650 000 ejemplares hallados, un 90% se ha localizado en sólo tres regiones: Filipinas, Australia e Indochina.

¿Meteorita o meteorito?

En publicaciones mexicanas, tanto del siglo XIX como del XX, se aprecia el uso indistinto del término con género femenino o masculino. Actualmente, entre los especialistas se utiliza uno u otro género y con frecuencia surgen discusiones sobre la validez de cada posición. Algunos opinan que lo correcto es decir “meteorita” porque se trata de rocas (riolita y arenisca, por ejemplo), pero olvidan que algunas rocas muy comunes tienen género masculino, como, por ejemplo, el basalto y el granito. Los que prefieren el término en masculino mencionan que éste se refiere al bloque o fragmento de material, utilizando un argumento análogo al de los partidarios del género femenino, y que la denominación no tiene que ver con los términos utilizados para su clasificación, como son condrita u octaedrita. Revisando el Coloquio y Mesa Redonda “Las Meteoritas” se encuentra cierta preferencia por el término en masculino, aunque algunos geólogos prefieren el uso del término en femenino.

En el artículo “¿Meteorita o Meteorito?”, de Cecilia Haupt y Raúl Rubinovich-Kogan [25], aparece una relación de los términos utilizados en diccionarios y enciclopedias de uso común en la lengua española. Estos autores realizan una revisión de diccionarios y enciclopedias encontrando lo siguiente:

El *Breve Diccionario Etimológico de la Lengua Española* de Corominas, consigna que el término “meteor” aparece utilizado por primera vez en 1611; con una etimología derivada del griego, del adjetivo neutro plural “meteora”, señalando que el derivado “meteorito” comienza a utilizarse en el siglo XVII con el significado meteorológico.

El *Diccionario de Autoridades*, aparecido en 1732, consigna sólo el término “meteor”, con género masculino, mientras que dos diccionarios geográficos del siglo XIX, el *Geográfico Universal*, impreso en Barcelona en 1832 por José Torner y el *Enciclopédico de Historia, Biografía, Mitología y Geografía*, impreso en París por la Librería de Garnier Hnos., en 1884, consignan la existencia de dos lugares geográficos que tienen nombres probablemente derivados del término “meteor”. Uno de ellos es Meteora, situado en Grecia, y otro Los Meteoros, en las cercanías de Tesalia, Turquía, actualmente Grecia.

La bivalencia “meteorita-meteorito” se encuentra en el *Primer Diccionario General Etimológico de la Lengua Española*, recopilado por Roque Barcia, publicado en Madrid en 1881. Aparece “meteorita”, con género

femenino, como sinónimo de aerolito. Otra obra que atribuye género femenino al término es el Diccionario General de la Lengua Española, de Vélez de Aragón de Madrid, 1898, en su vigésima edición. La definición es la siguiente: "Meteorita. f. min. Masa pétreo metálica que se precipita desde las regiones atmosféricas sobre la tierra acompañada de fenómenos constantes".

La consulta de dos ediciones del siglo XIX, la cuarta de 1803, y la décimotercera de 1889, del *Diccionario de la Academia Española* no arrojó ninguna información dado que no aparecen los términos consultados.

Un texto español de mineralogía del siglo XIX, *Elementos de Mineralogía General, Industrial y Agrícola*, de Felipe Naranjo y Garza, publicado en Madrid en 1862, utiliza el término "meteorito", mencionando muchos sinónimos: aerolitos, bólidos, piedras de la Luna, piedras de rayo, piedras atmosféricas.

En todas las fuentes del siglo XX que consultaron estos autores se utiliza el término con género masculino. Las obras consultadas fueron las siguientes: *Enciclopedia del Idioma*, de Martín Alonso, Madrid, 1958; *Diccionario Español de Sinónimos y Antónimos*, de Sáinz de Robles, Madrid, 1967; *Diccionario Enciclopédico Espasa-Calpe*, 1975; *Diccionario Ideológico de la Lengua Española*, de Julio Casares, Barcelona, 1979; *Diccionario Crítico Etimológico Castellano e Hispanoamericano*, J. Corominas, 1985; *Diccionario Planeta de la Lengua Española*, España, 1990; *Enciclopedia del Idioma*, de Martín Alonso, Aguilar, 1991.

Relativo a la lengua alemana consultaron el diccionario Slaby-Grossman, Barcelona, 1981, en el que la traducción para "meteorito" es "lufterscheinung", con género femenino (prácticamente todas las palabras del idioma alemán que terminan en "ung" tienen este género). La raíz de la palabra es: *die luft* (f.)- aire, atmósfera, cielo; *der schein* (m.)- brillo, claridad; *ung*, sufijo que indica abundancia y que generalmente tiene género femenino.

Relativo a la lengua inglesa recordemos que en ella los objetos inanimados no tienen género. Las referencias en lengua francesa proporcionan algunas sorpresas; la primera referencia corresponde al diccionario francés-español de Editorial Reyes, Madrid, 1956. El término "meteorite" está traducido como "meteorito" con género masculino. En cambio, el *Dictionnaire alphabetique et analogique de la langue francaise*, de Paul Robert, París, 1980, señala: "meteorite", n. m. ou f. y presenta la referencia en la que aparece utilizando el término: 1846. Besch. Masc; au fém en Littreé; de méteore. La consulta, obligada en este caso; del *Dictionnaire de la langue francaise*, Emile Littreé, Gallimard-Hachette, 1959. Se transcribe la definición: "meteorite". s. f. "Petits corps qui se meuvent hors de l'atmosphère de la terre, dans les espaces

intercosmiques. Les Météorithes pulvérulentes. Les météorithes pierreuses ou diverses especes minérales se trouvent habituellement meles a l'état d'agregation confuse". El punto interesante es que consigna el lugar donde apareció el término; se trata de un trabajo de Grandea y Laugel, que se publicó en *Revue des sciences*, en 1862, p. 41, pero, lamentablemente aún no se ha localizado esa publicación.

Los diccionarios geológicos en idioma castellano le asignan al término unánimemente género masculino: *Diccionario Monográfico del Reino Mineral*, Barcelona, Bibliograf S. A., 1981 (p. 163); *Diccionario de Geología*, de D. G. A. Whitten y J. R. V. Brooks, Alianza Editorial, Madrid, 1980 y 1986, cuyo título original es *The Penguin Dictionary of Geology* (p. 176); *Geological Nomenclature*, publicado por Royal Geological and Mining Society, Holanda, 1980, consigna los términos en inglés, holandés, francés, alemán y castellano.

Para mencionar sólo un ejemplo del uso del término en otro país latinoamericano, en Argentina sólo se utilizó el término meteorito, tal como quedó consignado en los trabajos de Juan Olsácher, uno publicado el mismo año que el catálogo de J. Haro (1931) [13] y otros posteriores en 1940 y 1951; también la *Guía de Meteoritos de la Argentina*, de Lorenzo Orestes Giacomelli, publicado en 1969, utiliza el término con género masculino.

Uso del término en publicaciones científicas mexicanas

En la segunda mitad del siglo pasado y en las primeras décadas de éste se utilizaban en México los términos "fierros meteóricos" para referirse a los meteoritos metálicos y "aerolitos" para los pétreos. El término "fierros meteóricos" se emplea en los trabajos de Ignacio Cornejo aparecidos en la revista *La Naturaleza*, en 1870, y en *El Minero Mexicano*, de 1874. El químico mexicano Leopoldo Río de la Loza también utilizó el término en su artículo "El fierro meteórico de Yanhuitlán", publicado en *El Boletín de la Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística*, en 1864. Ahí el autor da una extensa lista de sinónimos: piedras del cielo o del rayo, globos de fuego, fierro meteórico, nativo o volcánico, uranolitos, ceraunitos, acero nativo, bólidos, meteoritos, meteorolitos, etc. Río de la Loza hace patente su preocupación por el uso de los términos y, muy probablemente debido a alguna pugna con algún científico o publicación de la época donde se utiliza el término con género femenino, realiza un intento por uniformizar la terminología y señala: "Suele decirse, aun por personas ilustradas, aerolita por aerólito, equivocando así el género y la acentuación; mas como no se ha generalizado tanto el decir aerolito, y por otra parte la pronunciación es más fácil, no veo gran inconveniente en adoptarla, mas sí lo hallo en hacer el nombre femenino". Es así como recomienda el uso de

“fierro meteórico” para referirse a los meteoritos metálicos y “aerolito” para los pétreos, descartando la posibilidad de asignarle a ese sustantivo género femenino.

En *El Minero Mexicano* aparecen unas publicaciones anónimas en los números 34 de mayo 22, 35 de mayo 29 y 36 de junio 5 de 1879, donde se objeta la teoría que asignaba a los meteoritos un origen lunar, se sigue llamando “fierros meteóricos” a los meteoritos metálicos, pero a los pétreos se les designa como “meteoros ígneos” o “aerolitos”.

Antonio del Castillo, uno de los científicos mexicanos más interesados por los meteoritos, publica en 1864 en el *Boletín de la Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística* un artículo en donde al referirse al “fierro metálico” de Yanhuitlán lo designa como “aerolito”, extendiendo el término para los meteoritos metálicos, a pesar de la recomendación de Río de la Loza. En 1889 del Castillo publica un artículo en la revista *Minero Industrial*, en donde utiliza el término “meteorito”, y en el mismo año en el primer catálogo de meteoritos de México se refiere a ellos como *Fers et Perres Météoriques*, que fue traducido al castellano en el periódico *La Naturaleza* en 1890 como “tierras y piedras meteóricas”. Así, del Castillo nunca usó el término con género femenino, pero los carteles de los meteoritos que se exhiben en el Palacio de Minería provenientes, desde el siglo pasado, desde los estados de Chihuahua y Zacatecas a ese edificio por iniciativa del propio del Castillo se refieren a esos objetos como “meteoritas”.

Tres de los más importantes geólogos mexicanos del siglo XIX, José Guadalupe Aguilera, Mariano Bárcena y Ezequiel Ordoñez, publicaron trabajos relativos a los meteoritos. Aguilera utilizó en el *Anuario de la Academia Mexicana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, en 1887, el término con género femenino. Bárcena publicó en 1876 su contribución en inglés. Ordoñez, en 1889, mismo año de la publicación del catálogo de meteoritos de del Castillo, utiliza los términos “hierros meteóricos” y también “cristales meteóricos” en el título de su trabajo, pero en el interior del mismo utiliza siempre el término con género masculino.

En el *Glosario de Voces de Geología y Geografía Física* de Manuel Muñoz Lumbier, publicado en México en 1924 se utiliza el término con género masculino, ya que define “meteorito” como “Masa sólida que atravesando la atmósfera, cae en la tierra. Se les llama también aerolitos”; y “aerolito” como “Término empleado como sinónimo de meteorito”. Una fuente más moderna, el catálogo de meteoritos de México, del ingeniero José C. Haro, publicado en 1931, utiliza siempre el término en femenino, desde el título “Las meteoritas mexicanas. Generalidades sobre meteoritas y catálogo descriptivo de las

meteoritas mexicanas”. Esta publicación *postmortem* fue realizada por el Instituto Geológico de México, antecedente del actual Instituto de Geología de la UNAM, bajo la responsabilidad del Ing. Leopoldo Salazar Salinas.

Es muy difícil saber cuáles fueron las fuentes que utilizó Haro y cuál fue la norma que juzgó pertinente, lo cierto es que su catálogo es en gran parte responsable de que se haya extendido el uso del término con género femenino.

Dos autores extranjeros del siglo XIX, Roque Barcia y Vélez de Aragón, utilizan el género femenino, probablemente influenciados por el uso del término “meteorita” en lengua francesa. La principal influencia para designar al término con género femenino proviene con toda seguridad de esa lengua, en particular del trabajo científico publicado en 1862 que cita el diccionario de Littré, y que dado el estado de difusión de la ciencia meteorítica en esa época haya normado el uso con género femenino.

En México, el uso del término con género femenino seguramente se debió al “afrancesamiento” de las costumbres y la ciencia durante el porfiriato, al igual que en otros países de Latinoamérica. En nuestro país, y en especial en el campo de la meteorítica, tuvo una gran importancia e influencia la publicación del catálogo de meteoritos escrito en francés en 1889 por del Castillo. No obstante que este último utilizó en castellano el término con género masculino, Aguilera y otros científicos, seguramente influenciados por el uso del francés que el propio del Castillo había popularizado en su catálogo, usaron el término en femenino y esa costumbre se extendió hasta bien entrado este siglo, como se puede constatar en el trabajo de Haro en 1931.

Referencias del capítulo uno

1. *Diccionario Enciclopédico Salvat*, volumen 15, Salvat Editores S. A., Barcelona (1976) p.141.
2. R. Rubinovich-Kogan, S. Medina-Malagón y L. I. Torres, "Las raíces de la meteorítica en México", *Boletín de Mineralogía*, **5**, No.1 (1992) 13.
3. A. von Humboldt, *Veus des cordillères et monumens des peuples indigènes de l'Amérique*, La Libraire Grecque, Paris (1810) p.24. Citado en el *Boletín de Mineralogía*, *op cit*.
4. J. R. Bartlett, *Personal narrative of explorations and incidents in Texas, New Mexico, California, Sonora and Chihuahua*, 2 volúmenes (1854) pp. 455, 506 y 624. Reimpreso en 1965 por Río Grande Press, Incorporated, Chicago. Citado en el *Boletín de Mineralogía*, *op cit*.
5. A. del Castillo, *Catalogue descriptif des Météorites (Fers et pierres Météoriques) du Mexique*, Paris, Ed. Leon Ouin (1889). Citado en el *Boletín de Mineralogía*, *op. cit*.
6. L. Fletcher, "On the mexican meteorites, with special regard to the supposed occurrence of wide-spread meteoritic showers", *Mineral Mag.*, **9**, No.2 (1890) 91 y 129. Citado en el *Boletín de Mineralogía*, *op. cit*.
7. E.F.F. Chladni, *Über Feuer-meteore und die mit Denselben Herabgefallenen massen. Nebst zehn Steindrucctafeln und Deren Erklärung von Carl von Schreibers*, J.G. Heubner, Viena (1819) p. 339. Citado en el *Boletín de Mineralogía*, *op. cit*.
8. F.T. Sonnenschmidt, *Mineralogisch Beschreibung der vorzüglichsten Bergwerks- Reviere von Mexiko oder Neues Spanien*, Schleiz (1804) p. 288. Citado en el *Boletín de Mineralogía*, *op. cit*.
9. M. Bárcena, "On certain Mexican meteorites", *Acad. Nat. Sci. Phil. Proc.*, (1876) 122. Citado en el *Boletín de Mineralogía*, *op. cit*.
10. E. Angermann, "El fierro meteórico de Bacubirito (estado de Sinaloa)", *Inst. Geol. Mex.*, v.1 núm. 4 (1903) 113. Citado en el *Boletín de Mineralogía*, *op. cit*.
11. H.A. Ward, "On Bacubirito or the great meteorite of Sinaloa, Mexico", *Rochester Acad. Sci. Proc.*, **4** (1902) 67. También en: *Am. Geol.*, **30**, No.4 (1902) 203. Citado en el *Boletín de Mineralogía*, *op. cit*.
12. E. G. Tarayre, "Rapport sur l'exploration minéralogique des regions mexicaines", *Arch. Comm. Sci. Mexique*, Paris, **3** (1867) 173, 343, 348. Citado en el *Boletín de Mineralogía*, *op. cit*.
13. J. C. Haro, "Las meteoritas mexicanas. Generalidades sobre meteoritas y catálogo descriptivo de las meteoritas mexicanas", Univ. Nac. Autón.

- México, Inst. Geol., *Boletín*, No. 50 (1931) p. 78. Citado en el *Boletín de Mineralogía, op. cit.*
14. J. de la Herrán, "Asteroide en Mayab", *Ciencia y Desarrollo*, XVII, No. 102 (1992) 129.
 15. B. Mason, *Meteorites*, John Wiley and Sons, New York (1962). Citado en el *Boletín de Mineralogía, op. cit.*
 16. B. Mason, "Meteorites", *Am. Sci.*, 55, No. 4 (1967) 429. Citado en el *Boletín de Mineralogía, op. cit.*
 17. G. T. Prior, "The classification of meteorites", *Mineral Mag.*, 19, No. 90 (1920) 51. Citado en el *Boletín de Mineralogía, op. cit.*
 18. J. T. Wasson and C. M. Wai, "Composition of the metal, schreibersite and pyrite of enstatite achondrite and the origin of enstatite chondrites and achondrites", *Geochim Cosmochem. Acta*, 34, No. 2 (1970) 169. Citado en el *Boletín de Mineralogía, op. cit.*
 19. H. B. Wilk, "The chemical composition of some stony meteorites", *Geochem. Cosmochem. Acta*, 9, Nos. 5-6 (1956) 279. Citado en el *Boletín de Mineralogía, op. cit.*
 20. E. Goldberg, A. Uchiyama, and H. Brown, "The distribution of nickel, cobalt, gallium, palladium, and gold in iron meteorites", *Geochem. Cosmochem. Acta*, 2, No. 1 (1951) 1.
 21. J. F. Lovering, W. Nichiporuk, A. Chodos, and H. Brown, "the distribution of gallium, germanium, cobalt, chromium, and copper in iron and stony-iron meteorites in relation to nickel content and structure", *Geochem. Cosmochem. Acta*, 11, No. 4 (1957) 263.
 22. Buchwald, *Handbook of iron meteorites*, Cent. Meteor. Stud., ariz. State Univ. University of California Press (1975). Citado en el *Boletín de Mineralogía, op. cit.*
 23. B. Mason, "The mineralogy of meteorites", *Meteoritics*, 7, No. 3 (1972) 309. Citado en el *Boletín de Mineralogía, op. cit.*
 24. S. R. Taylor, *Tektites: a post- Apollo*, Oxford, Pergamon Press (1973), Citado en el *Boletín de Mineralogía, op. cit.*
 25. C. Haupt y R. Rubinovich-Kogan, "¿Meteorita o meteorito?", *Boletín de Mineralogía*, 5, No. 1 (1992) 91.

Capítulo dos

Espectroscopía Mössbauer

El efecto Mössbauer consiste en que ciertos núcleos pueden emitir o absorber radiación gamma de manera resonante, dado que la energía de esta radiación no se ve afectada por el movimiento térmico de los núcleos ni por el retroceso que experimentan durante los procesos de emisión y radiación. El físico alemán Rudolf Mössbauer lo descubrió en 1957 [1] y le valió el Premio Nobel de Física en 1961.

Absorción resonante

El fenómeno de la absorción resonante ocurre cuando los núcleos que emiten o absorben radiación no reculan, pues este proceso toma parte de la energía de la radiación y, en el caso de los núcleos libres, causa un corrimiento en las líneas de emisión y de absorción. Este corrimiento generalmente es mayor que el ancho natural de la línea correspondiente a la transición nuclear y esto hace que se pierda la “sintonía” del proceso de resonancia. En la Fig. 1 se muestra el corrimiento entre las líneas de emisión y de absorción debido a la energía de retroceso E_r de los núcleos.

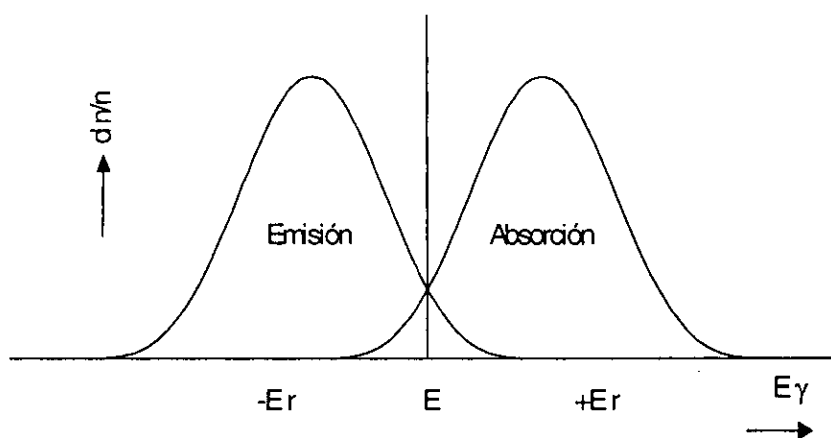


Figura 1. Corrimiento entre las líneas de emisión y de absorción causado por la energía de retroceso E_r de los núcleos. La zona de traslape es en donde ocurre la resonancia.

Cuando un átomo está sujeto a la malla cristalina de un sólido y la energía de retroceso es tal que la estructura cristalina no se altera, se tiene

entonces la condición para que ocurra el fenómeno de resonancia. En este caso el átomo emisor sólo puede excitar fonones del cristal; no obstante, también puede suceder que la energía de retroceso sea menor que la energía de excitación fonónica y es entonces el cristal el que retrocede como un todo y de esta manera la línea de emisión no sufre ningún corrimiento. En otras palabras, la energía del fotón emitido es esencialmente igual a la de la transición nuclear; en el proceso de absorción puede tener lugar un proceso semejante (sin excitación fonónica). En promedio, la energía transmitida a la red como consecuencia de un gran número de procesos es la energía de retroceso del átomo libre. El porcentaje de eventos que ocurren sin que haya emisión fonónica, en la emisión y en la absorción de la radiación gamma, es conocido como fracción Mössbauer; es una función de las propiedades vibracionales de la red cristalina y viene dada por la expresión [2,3]

$$f = \exp\left(-\frac{E_\gamma^2 \langle x^2 \rangle}{\hbar^2 c^2}\right), \quad (1)$$

donde $\langle x^2 \rangle$ es la amplitud vibracional cuadrática media del núcleo en la dirección de la radiación y E_γ es la energía del rayo γ . En sólidos reales la expresión para $\langle x^2 \rangle$ puede ser muy compleja, ya que depende de las propiedades vibracionales de la red cristalina; no obstante, siempre es posible considerar un cristal ideal y aplicar el modelo de Debye. La expresión que se obtiene [4] en este caso para la fracción Mössbauer es la siguiente:

$$f = \exp\left\{-\frac{6E_r}{k\theta_D} \left[\frac{1}{4} + \left(\frac{T}{\theta_D}\right)^2 \int_0^{\frac{\theta_D}{T}} \frac{x dx}{e^x - 1} \right]\right\}, \quad (2)$$

donde E_r es la energía de retroceso del núcleo, k es la constante de Boltzmann y θ_D es la temperatura de Debye del cristal. De la Ec. (2) es claro que f es grande cuando θ_D es grande, lo que equivale a una red con enlaces cristalinos fuertes, y cuando la temperatura T es pequeña. En el límite, cuando T tiende a cero, la Ec. (2) se transforma en

$$f_{T=0} = \exp\left\{-\frac{3E_r}{2k\theta_D}\right\}; \quad (3)$$

lo cual significa que la absorción o emisión se optimiza si el núcleo está fuertemente ligado a una red cristalina a baja temperatura.

Forma de la línea de absorción

La forma del perfil de la línea de emisión se puede calcular ya que han sido determinadas las condiciones bajo las cuales ocurre la absorción resonante. Para la obtención de un espectro Mössbauer se utiliza como fuente de radiación gamma a núcleos emisores en su estado excitado, difundidos en una matriz sólida y la radiación así emitida es reabsorbida y vuelta a emitir por los núcleos del material bajo estudio.

Si la fuente y el absorbedor están en movimiento relativo con una velocidad v , el valor efectivo de la energía de los rayos γ puede modificarse, de tal forma que la energía "vista" por el absorbedor difiere de E_γ por un pequeño corrimiento Doppler $\varepsilon=(v/c)E_\gamma$. El número de cuentas del detector disminuirá cuando la velocidad relativa haga que la energía E_γ de la radiación cumpla con la condición de resonancia. A velocidades mayores o menores que este valor particular la resonancia irá disminuyendo hasta ser cero. La forma de la línea de absorción de un espectro Mössbauer se muestra en la Fig. 2. Es una gráfica de transmisión *versus* los valores de la velocidad Doppler entre la fuente y la muestra, esto es, *versus* la energía efectiva del rayo γ .

El perfil de la línea de emisión se deriva fácilmente. Si la probabilidad de emisión sin retroceso de la fuente es f_f y la radiación tiene un ancho de línea Γ , la distribución de energías en torno a la máxima energía de los fotones emitidos E_γ , viene dada por la fórmula de Breit- Wigner, que se traduce en una distribución lorentziana:

$$N(E)dE = \frac{f_f \Gamma}{2\pi} \frac{dE}{(E - E_\gamma)^2 + (\Gamma/2)^2}, \quad (4)$$

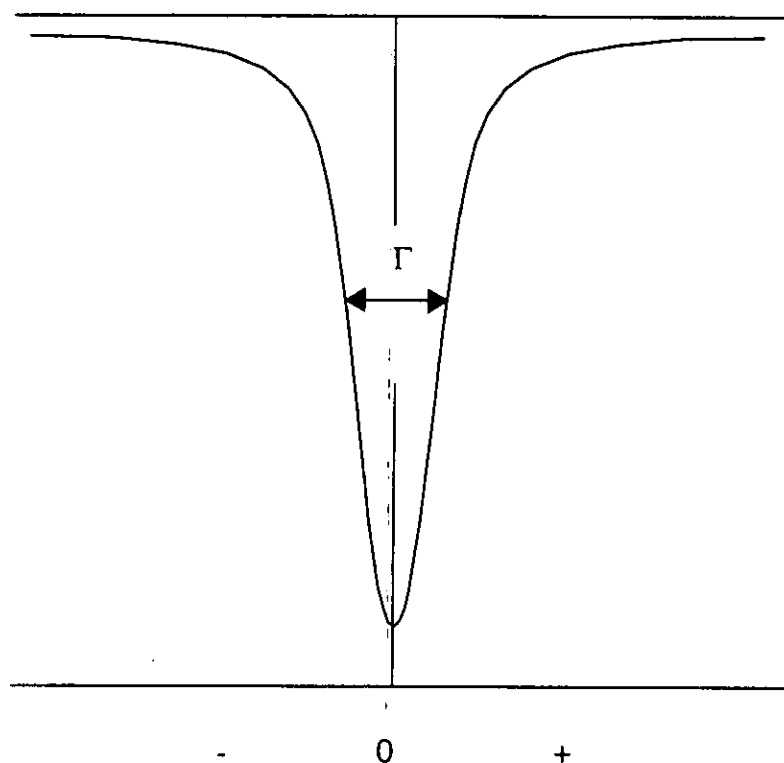
donde $N(E)$ es el número de transiciones con una energía entre E y $E+dE$. Análogamente el perfil de absorción resonante $\sigma(E)$ es

$$\sigma(E) = \sigma_0 \frac{(\Gamma/2)^2}{(E - E_\gamma)^2 + (\Gamma/2)^2}, \quad (5)$$

donde σ_0 es una constante nuclear llamada sección transversal de absorción y viene dada por

$$\sigma_0 = 2\pi \left(\frac{\hbar c}{E_\gamma} \right)^2 \frac{2I_e + 1}{2I_b + 1} \frac{1}{1 + \alpha} \quad (6)$$

donde I_b e I_e son, respectivamente, los espines nucleares del estado básico y del estado excitado y α es la constante de conversión interna de los rayos γ . (No todas las transiciones nucleares producen un rayo gamma físicamente detectable; una proporción de ellas expulsa electrones desde los orbitales atómicos, produciendo, en cambio, rayos X y tales electrones. El coeficiente de conversión interna α de una transición nuclear está definido como el cociente del número de electrones de conversión entre el número de fotones emitidos.)



Corrimiento Doppler relativo $\varepsilon = \frac{v}{c} E_\gamma$

Figura 2. Espectro Mössbauer de transmisión en función del corrimiento Doppler.

Isótopos Mössbauer

Para que ocurra el efecto Mössbauer son necesarias las siguientes condiciones:

1. La energía del rayo γ debe estar comprendida entre 10 y 150 keV, de preferencia menor que 50 keV, pues tanto la fracción Mössbauer f como la sección transversal resonante σ_0 decrecen cuando E_γ crece.
2. La vida media del primer estado excitado del núcleo, que es la que determina el ancho de línea Γ , debe estar entre 1 y 100 nanosegundos, ya que si es más grande, Γ es muy estrecha y cualquier vibración mecánica puede destruir la resonancia. Si por el contrario, la vida media es más pequeña, la línea es tan ancha que puede ocultar las interacciones hiperfinas.
3. Debe existir un elemento precursor que tenga una vida media grande, que pueble el estado excitado.
4. El isótopo en su estado de menor energía debe ser muy abundante.

La resonancia más conocida es la transición de 14.4 keV del ^{57}Fe , cuyo precursor es el ^{57}Co , que decae por captura electrónica al nivel de 136.3 keV del ^{57}Fe , que a su vez puebla el primer estado excitado ($I_e=3/2$), que decae al estado básico ($I_e=1/2$) emitiendo un fotón de 14.4 keV. La vida media de ese estado es de $\tau=97.7$ ns; de aquí que el ancho de línea de Heisenberg, calculado a partir del principio de indeterminación, es de $\Gamma_H=4.67 \times 10^{-9}$ eV. Como en un experimento se superponen las líneas de emisión y de absorción, hay que convolucionar las curvas y el ancho (Γ) de la línea experimental de ^{57}Fe es $2\Gamma_H$, lo cual, en términos de la velocidad Doppler ($v/c=\Gamma/E_\gamma$), es de 0.192 mm/s. Un corrimiento en la línea Mössbauer, de la mitad del ancho natural, ya es detectable, por lo tanto,

$$\frac{\Delta E}{E_\gamma} = \frac{\Gamma/2}{E_\gamma} = \frac{4.67 \times 10^{-9} (\text{eV})}{14.4 \times 10^3 (\text{eV})} = 0.32 \times 10^{-12}.$$

Es por esta razón que la espectroscopía Mössbauer proporciona una gran precisión intrínseca, capaz de detectar cambios fraccionales de energía del orden de 10^{-13} eV. Hay que agregar que uno de los aspectos experimentales más importantes es la matriz en la que se monta el núcleo emisor, ya que debe tener

una fracción Mössbauer grande y una sola línea de emisión; es decir, que no haya desdoblamientos por las interacciones hiperfinas.

Interacciones hiperfinas

Carga eléctrica, tamaño finito, forma geométrica y momento dipolar magnético son las cuatro características básicas del núcleo atómico que al interactuar con los electrones y, en general, con las cargas que lo rodean, dan origen a interacciones fundamentales. Como ya se mencionó, la espectroscopía Mössbauer proporciona un medio para detectar cambios fraccionales de energía del orden de 10^{-13} , lo cual es idóneo para estudiar tales interacciones, que son tres, a saber:

1. El tamaño finito del núcleo más los electrones s serán los factores de la interacción conocida como **corrimiento isomérico**, la cual consiste en un corrimiento de la velocidad relativa cero con la línea de emisión.
2. La forma del núcleo más el gradiente de campo eléctrico, debido principalmente a los electrones de valencia y al campo cristalino, serán los que originen el **desdoblamiento cuadrupolar eléctrico**. Este efecto produce, en el caso del ^{57}Fe , que la línea de resonancia se desdoble en dos.
3. La interacción dipolar magnética entre el momento magnético del núcleo y un campo magnético, interno o externo, origina, en el caso del ^{57}Fe , un desdoblamiento de la línea en seis. Éste es el **efecto Zeeman nuclear**.

Corrimiento isomérico

En ocasiones es conveniente considerar la interacción coulombiana entre los electrones y el núcleo como un modelo de cargas puntuales. Éste predice que no hay cambio en la energía de interacción coulombiana cuando un núcleo decae de su estado excitado a su estado base; sin embargo, el núcleo tiene un tamaño finito y la función de onda de los electrones s y $p_{1/2}$ (estos últimos si se toma el caso relativista) es diferente de cero en el origen nuclear, por lo tanto puede ocurrir un cambio fraccional en la energía durante la transición.

La energía electrostática para un electrón de carga $-e$ moviéndose en el campo de fuerza de un núcleo de carga $+Ze$ viene dada por

$$E_0 = -\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0} \int_0^\infty |\Psi(r)|^2 \frac{d\tau}{r}, \quad (7)$$

donde ϵ_0 es la permitividad del vacío, r es la distancia radial y $-e|\Psi|^2$ es la densidad de carga en el volumen $d\tau$. Si el núcleo tiene forma esférica con un radio R , la Ec. (7) sólo es válida para $r > R$; pero si $r < R$, hay que hacer una corrección a la energía (W) suponiendo un modelo para la densidad de carga del protón dentro del núcleo [5]. Si la densidad se toma como uniforme tenemos que

$$W = \frac{1}{10\epsilon_0} Ze^2 R^2 |\Psi_s(0)|^2, \quad (8)$$

donde $|\Psi_s(0)|^2$ es la función de onda electrónica en el origen nuclear.

Si el radio nuclear sufre un pequeño cambio ΔR durante la transición del estado excitado al básico, habrá simultáneamente un cambio en la energía electrostática dado por

$$\Delta W = \frac{1}{5\epsilon_0} Ze^2 R^2 \frac{\Delta R}{R} |\Psi_s(0)|^2. \quad (9)$$

El valor $\Delta R/R$ es característico para cada transición y es del orden de 10^{-4} . Puesto que la espectroscopía Mössbauer compara la diferencia energética de las transiciones nucleares entre la fuente y el absorbedor, el corrimiento isomérico viene dado por

$$\delta = \frac{1}{5\epsilon_0} Ze^2 R^2 \frac{\Delta R}{R} \left(|\Psi_s(0)_A|^2 - |\Psi_s(0)_F|^2 \right), \quad (10)$$

donde $|\Psi_s(0)_A|^2$ y $|\Psi_s(0)_F|^2$ son las densidades electrónicas de los electrones s en el origen nuclear, de la fuente y el absorbedor, respectivamente.

Interacción cuadripolar eléctrica

Cualquier núcleo con un espín mayor que $\frac{1}{2}$ tiene una distribución de carga asimétrica. La magnitud de la deformación de ésta, se conoce como el momento cuadripolar nuclear Q y viene dado por

$$eQ = \int \rho r^2 (3 \cos^2 \theta - 1) d\tau, \quad (11)$$

donde e es la carga del protón, ρ la densidad de carga nuclear en el elemento de volumen $d\tau$, que está localizada a una distancia r desde el centro del núcleo y formando un ángulo θ con el eje de cuantización del espín nuclear.

En un átomo ligado en una red cristalina, la distribución de carga en su entorno no es, en general, esféricamente simétrica y existe un gradiente de campo eléctrico que se define por

$$\nabla E = -V_{ij} = -\frac{\partial^2 V}{\partial x_i \partial x_j} \quad (12)$$

El hamiltoniano que describe la interacción del momento cuadripolar nuclear con la distribución de carga puede escribirse como

$$\mathcal{H} = -\frac{1}{6} e\mathbf{Q} \cdot \nabla E. \quad (13)$$

Escogiendo un sistema de ejes principales para que el tensor sea diagonal y que el eje z esté en la dirección de la máxima componente del gradiente de campo eléctrico ($V_{zz} = eq$), y tal que $|V_{zz}| > |V_{yy}| \geq |V_{xx}|$ y tomando en cuenta la ecuación de Laplace ($V_{xx} + V_{yy} + V_{zz} = 0$), la Ec. (12) se transforma en

$$H = \frac{eQ}{2I(2I-1)} [V_{xx}I_x^2 + V_{yy}I_y^2 + V_{zz}I_z^2] = \frac{e^2qQ}{4I(2I-1)} [3I_z^2 - I^2 + \eta(I_x^2 - I_y^2)] \quad (14)$$

donde I_x , I_y e I_z son los operadores del espín nuclear y $\eta = (V_{yy} - V_{xx}) / V_{zz}$ es el llamado parámetro de asimetría. Si η es cero, los niveles energéticos vienen dados por

$$E_Q = \frac{e^2qQ}{4I(2I-1)} [3m_z^2 - I(I+1)] \quad (15)$$

donde m_z es el número cuántico de espín, cuyos valores pueden ser $I, I-1, \dots, -I$.

En el caso del ⁵⁷Fe el estado excitado ($I_e = 3/2$) se desdobra en dos subniveles, rompiéndose parcialmente la degeneración: uno para $I_z = \pm 3/2$ y una energía $+e^2qQ/4$ y el otro para $I_z = \pm 1/2$ y una energía $-e^2qQ/4$, mientras que en el

estado básico ($I_b = 1/2$), no se rompe la degeneración. En el caso que η sea mayor que cero, la expresión exacta para $I=3/2$ es

$$E_Q = \frac{e^2 q Q}{4I(2I-1)} [3m_z^2 - I(I+1)] \left(1 + \frac{\eta^2}{3} \right)^{\frac{1}{2}} . \quad (16)$$

Para el caso de espines mayores es necesario realizar un cálculo numérico.

En el caso del ^{57}Fe , el espectro resultante es un doblete (ver Fig. 3) con una separación

$$\Delta Q = (e^2 q Q / 2)(1 + \eta^2 / 3) , \quad (17)$$

que es el llamado desdoblamiento cuadripolar

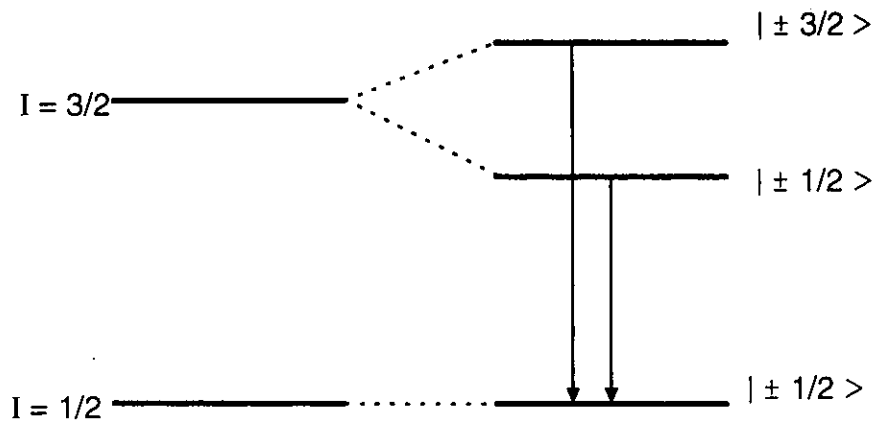


Figura 3. Desdoblamiento cuadripolar para la transición del estado $I_c=3/2$ al estado $I_b=1/2$.

Interacciones magnéticas

La segunda de las interacciones hiperfinas es el efecto Zeeman nuclear, que se produce cuando existe un campo magnético en el núcleo. Este campo magnético puede ser producido por los átomos de la red cristalina, vía interacciones de intercambio, o bien por un campo externo aplicado.

El hamiltoniano que describe la interacción dipolar magnética, viene dado por

$$\mathcal{H} = -\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{H} = -g\mu_N \mathbf{I} \cdot \mathbf{H} , \quad (18)$$

en donde μ es el momento magnético nuclear, I es el espín nuclear, g el factor de Landé nuclear ($g = \mu / I \mu_N$) y μ_N el magnetón nuclear de Bohr. Suponiendo que H está sobre el eje z , los valores propios del hamiltoniano, vienen dados por

$$E_m = -\frac{\mu H m_z}{I} = -g \mu_N H m_z, \quad (19)$$

donde m_z es el valor propio de I_z ($m_z = I, I-1, \dots, -I$). Es decir, la interacción rompe totalmente la degeneración y desdobra el nivel con espín nuclear I en $2I+1$ subniveles. Las reglas de selección en el caso de transiciones dipolares magnéticas ($\Delta m_z = 0, \pm 1$) determinan el número de líneas observadas. Por ejemplo, en el caso del ^{57}Fe (la transición Mössbauer es del estado $I_e = 3/2$ al $I_b = 1/2$) sólo pueden ocurrir seis de las ocho transiciones posibles (ver Fig. 4).

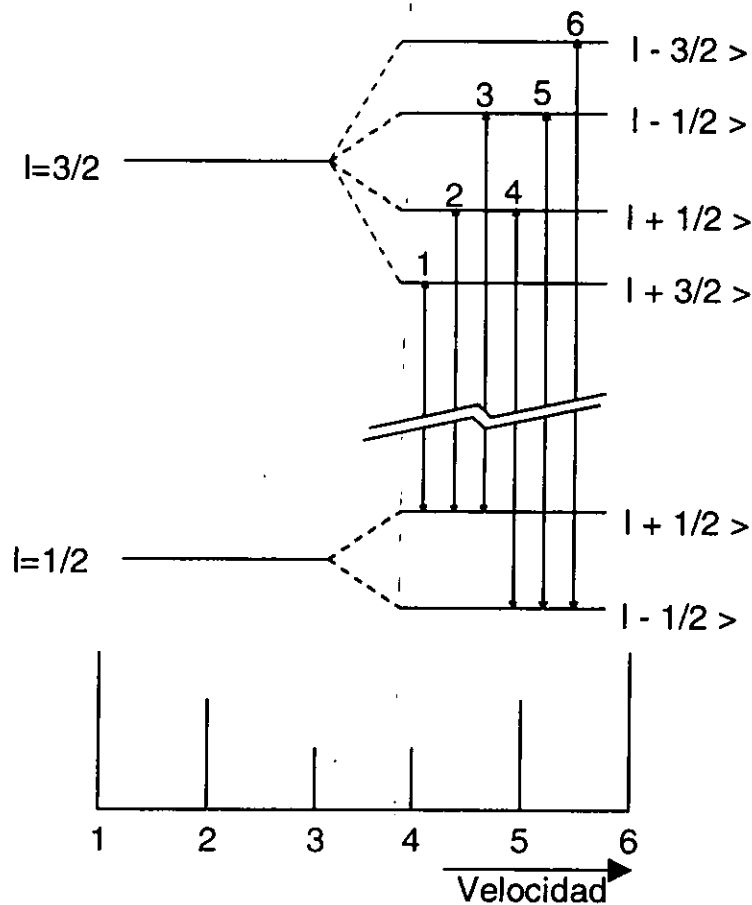


Figura 4. Desdoblamiento magnético para la transición del estado $I_e = 3/2$ al estado $I_b = 1/2$.

Interacciones combinadas

Cuando están presentes tanto la interacción magnética como la cuadripolar, no es de sorprender que el espectro hiperfino se complique considerablemente, ya que ambas tienen que ver con la simetría del núcleo con sus alrededores, y puesto que los ejes principales no son necesariamente colineales, el efecto resultante puede ser muy complejo [6].

El hamiltoniano, que es la suma de las dos interacciones, no tiene solución general. Sólo existen soluciones particulares, por ejemplo para la transición $1/2 \rightarrow 3/2$ cuando la interacción cuadripolar es mucho más débil que la magnética y puede ser tratada como una perturbación a esta última. En este caso los niveles energéticos vienen dados por

$$E_{QM} = -g\mu_N H m_z + (-1)^{|m_z|+1/2} \frac{e^2 q Q}{4} \left(\frac{3 \cos^2 \theta - 1}{2} \right), \quad (20)$$

donde θ es el ángulo entre la dirección del campo magnético y el eje z del tensor gradiente de campo eléctrico. Todas las líneas magnéticas hiperfinas están corridas por una cantidad

$$|\varepsilon| = \frac{e^2 q Q}{4} \left(\frac{3 \cos^2 \theta - 1}{2} \right), \quad (21)$$

pero el ángulo θ y el valor de $e^2 q Q$ no pueden ser determinados separadamente a partir de la posición de las líneas. Una ilustración esquemática de esta situación se da en la Fig. 5. La presencia de una pequeña perturbación cuadripolar es fácilmente visible porque el espectro ya no es simétrico respecto al centro. Si por azar $\cos^2 \theta = 1/3$, entonces el segundo término de la Ec. (20) se hace cero y el espectro parece ser el de un desdoblamiento magnético hiperfino no perturbado. El signo de $e^2 q Q$ y la magnitud de η no pueden ser determinadas a partir del desdoblamiento cuadripolar de la transición de $1/2$ a $3/2$ en un absorbedor policristalino, porque el espectro es simétrico. Un medio para obtener esta información es remedir el espectro en un campo magnético grande aplicado externamente con una densidad de flujo magnético de 30-50 T. Es costumbre aplicar el campo paralela o perpendicularmente al haz de los rayos gamma. El espectro resultante es de forma compleja, reflejando la orientación aleatoria del tensor gradiente del campo eléctrico con respecto al campo aplicado, pero no es

simétrico, así que el signo de $e^2 qQ$ queda determinado. La forma del espectro puede ser calculada sumando numéricamente los espectros calculados individualmente para un número grande de orientaciones del tensor gradiente del campo eléctrico [6].

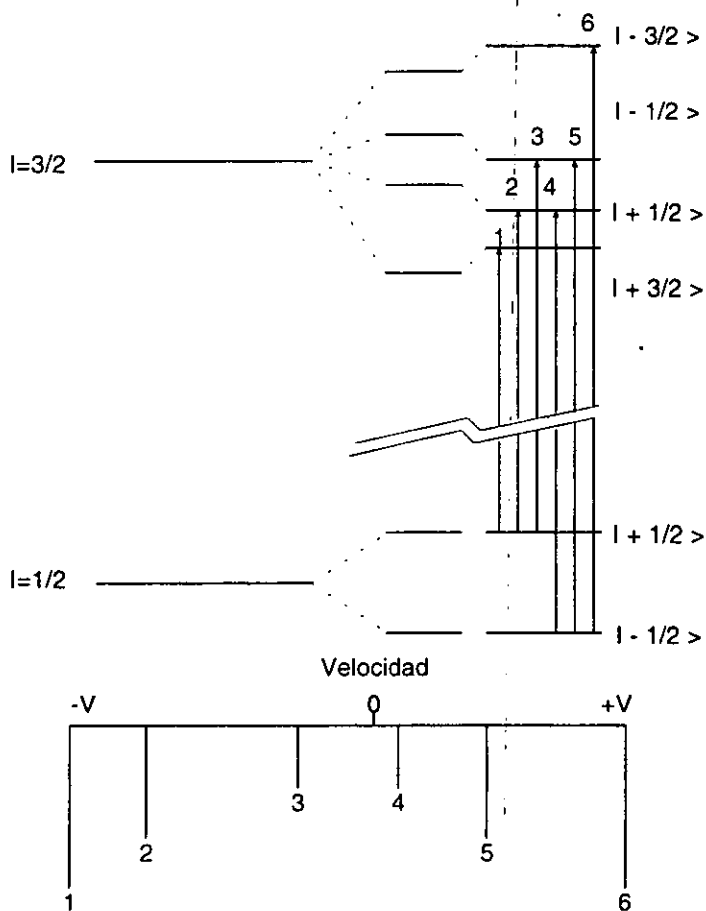


Figura 5. El efecto de una pequeña perturbación cuadrupolar sobre un desdoblamiento magnético hiperfino de los niveles $1/2$ al $3/2$. Las líneas 1 y 6 están corridas una cantidad $+\epsilon$, mientras las líneas 2,3,4 y 5 están corridas por $-\epsilon$. La diferencia en las separaciones 1-2 y 5-6 es, por lo tanto, 4ϵ .

La resonancia del ^{57}Fe constituye uno de los mejores ejemplos de este método. El campo aplicado desdobra la componente $\pm 3/2$ del espectro cuadrupolar en un doblete aparente, y la componente $\pm 1/2$ en un triplete aparente. En la Fig. 6 se muestran algunos ejemplos típicos de espectros

calculados. El espectro tiende hacia una forma simétrica conforme η se aproxima a la unidad (esto es, cuando $V_{zz}=-V_{yy}$ el signo del eje mayor está indeterminado), y puede ser utilizado para determinar η con una precisión de alrededor de ± 0.05 .

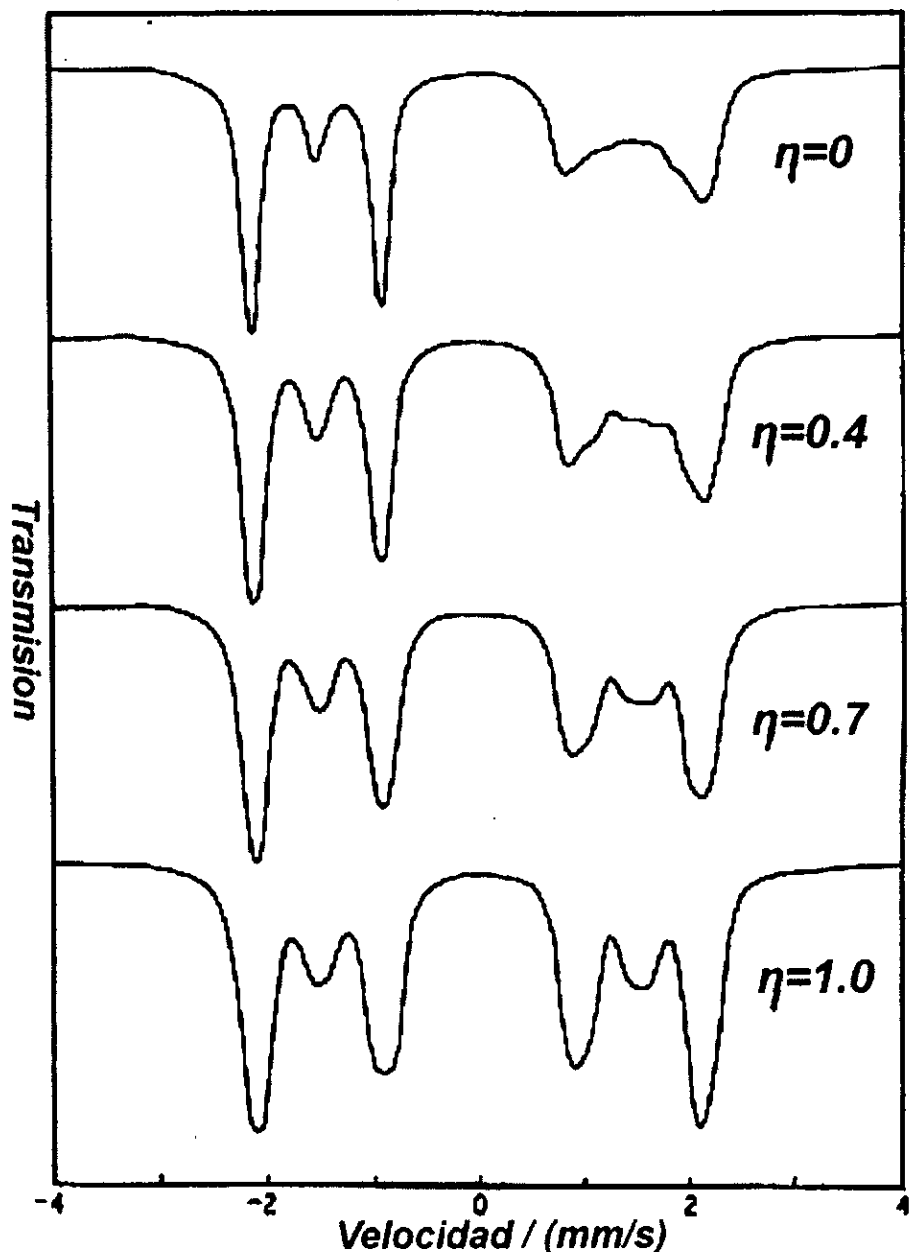


Figura 6. Espectros calculados para un absorbedor policristalino dando un desdoblamiento de cuadrupolo en el ^{57}Fe de $\Delta Q=3\text{mm s}^{-1}$ y en un campo aplicado con una densidad de flujo de 5 T paralelo a la dirección de observación. El espectro resulta simétrico cuando η tiende a la unidad. El signo de e^2qQ es positivo en todos los casos.

Diseño experimental

El diseño experimental de un espectrómetro Mössbauer se muestra en la Fig. 7 y consta de:

1. Fuente Mössbauer de ^{57}Co (radiación γ).
2. Servomecanismo de movimiento.
3. Absorbedor.
4. Horno o criostato.
5. Detector.
6. Sistema de amplificación.
7. Tarjeta multicanal.
8. Computadora.

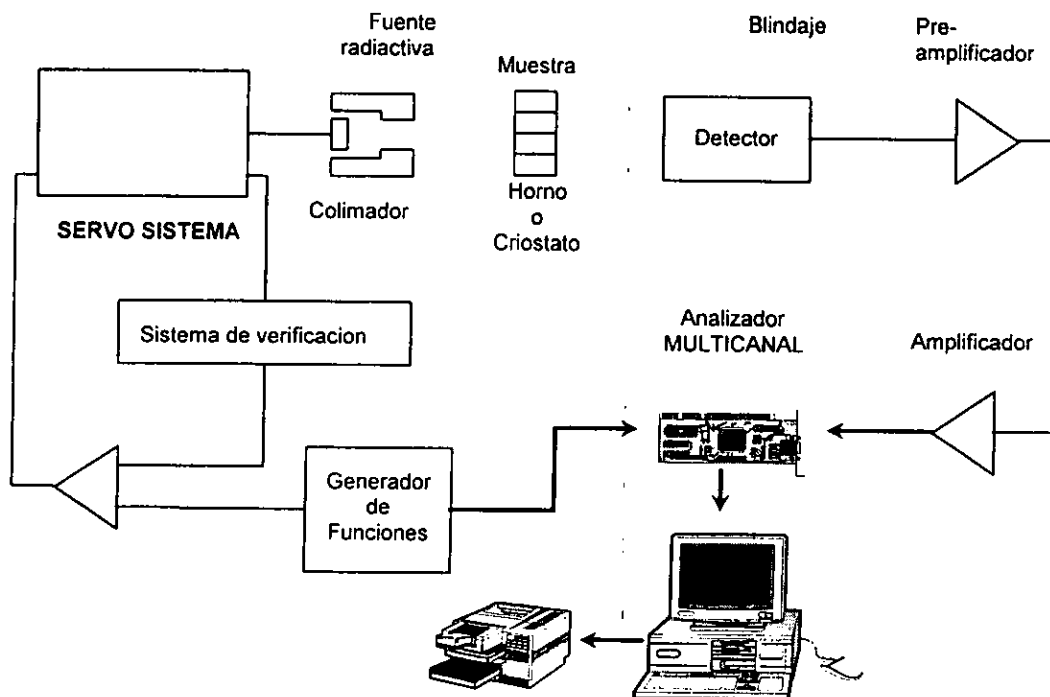


Figura 7. Diagrama en bloques de un espectrómetro Mössbauer.

La observación de un espectro Mössbauer, requiere de una comparación entre la intensidad transmitida por el absorbedor en resonancia y fuera de la resonancia. Para lograr esto, es necesario que exista un movimiento relativo entre la fuente y el absorbedor. Una manera de lograrlo es moviendo la fuente radiactiva con aceleración constante en sincronía con el barrido de los

canales del multicanal, de tal forma que a cada canal le corresponda esencialmente una velocidad.

La fuente está fija en el eje de un motor y se cubre con un blindaje de plomo, de tal manera que solamente hay una abertura (colimador) que permite el paso de la radiación al absorbedor y de ésta al detector.

La radiación transmitida a través del absorbedor es recibida por un detector proporcional y la señal se preamplifica y amplifica. Estos pulsos pasan a la tarjeta multicanal (la cual puede operar en forma de análisis de altura de pulsos o bien como multiescalador) que está instalada en una computadora, en la cual se hace la discriminación de la radiación, eliminando los pulsos de energías mayores y menores que la de 14.4 keV. Hecho lo anterior, la tarjeta se opera en forma de multiescalador y los datos se registran y almacenan en la computadora.

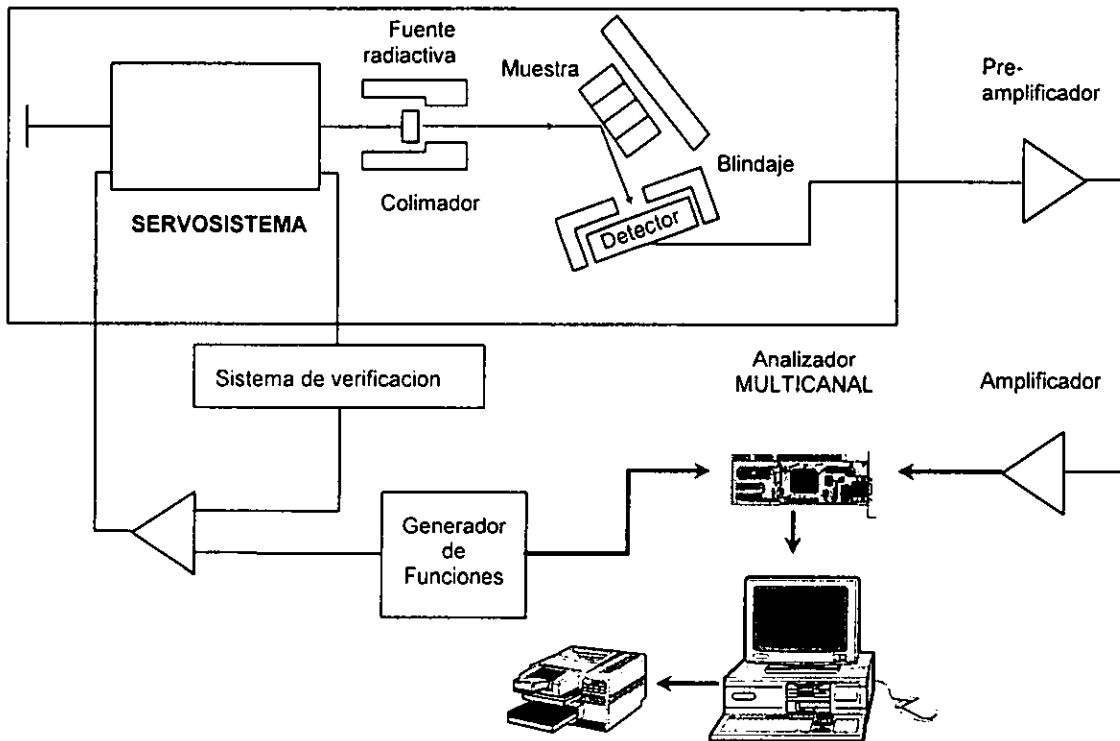


Figura 8. Dispositivo experimental utilizado en este trabajo.

El dispositivo experimental que se emplea en este trabajo difiere un poco del dispositivo típico mostrado anteriormente, en el cual la radiación de la fuente atraviesa a la muestra y lo que se detecta es la disminución en la intensidad transmitida debida a la absorción resonante. Sin embargo, como los

meteoritos objeto de este estudio son piezas de museo, se requiere hacer un análisis no destructivo de las mismas. Normalmente el espesor de los meteoritos es tal que es imposible obtener un espectro de transmisión. En consecuencia, se optó por la detección de la radiación reemitida por los núcleos después de que se ha producido la absorción resonante. Como esta radiación se reemite en todas direcciones, su intensidad en la dirección del detector es muy pequeña, haciendo que los tiempos de acumulación aumenten considerablemente. No obstante, los espectros así obtenidos tienen una buena relación señal a ruido aun para conteos relativamente bajos. Es por estas razones que la geometría del dispositivo experimental se cambió para poder realizar el estudio de los meteoritos y es mostrado en la Fig. 8.

Referencias del capítulo dos

1. R.L. Mössbauer, *Z. Physik*, **151** (1958) 124.
2. H.J. Lipkin, *Ann. Phys.*, **9** (1960) 332.
3. J. Petzolt, *Z. Physik*, **163** (1961) 71.
4. H. Fraunfelder, *The Mössbauer Effect*, W.A. Benjamin Inc., N.Y. (1962).
5. G. Breit, *Rev. Mod. Phys.*, **30** (1958) 507.
6. T.C. Gibb, *Principles of Mössbauer Spectroscopy*, Chapman and Hall, London (1976) p. 36.

Capítulo tres

Análisis Mössbauer de algunos meteoritos mexicanos

En este capítulo se presentan los resultados de los análisis realizados, por medio de espectroscopía Mössbauer, a algunos de los meteoritos caídos en territorio mexicano y que forman parte de la colección del Museo del Instituto de Geología de la UNAM.

Los meteoritos analizados son:

1. Bacubirito.
2. Cacaria.
3. Casas Grandes.
4. Catorce.
5. Charcas.
6. Chupaderos.
7. Morito.
8. Santiago Papasquiari.
9. Tule.
10. Xiquipilco.

Se trata de meteoritos féreos y, como ya se mencionó, los espectros obtenidos fueron de emisión. La fuente emisora de 50 milicuries es de ^{57}Co en una matriz de rodio. Todos los espectros fueron obtenidos a temperatura ambiente. El estudio fue realizado con el espectrómetro Mössbauer del Laboratorio de Física Atómica y Molecular (FAM) del Departamento de Física de la Facultad de Ciencias en la UNAM [1]. La obtención de los espectros se realizó a partir de la segunda quincena de marzo hasta finales de mayo de 1998, procediendo después al ajuste de los mismos mediante un programa de mínimos cuadrados restringido. Dado lo relativamente bajo de los conteos, para la obtención del espectro de cada meteorito se emplearon cuatro días. Para reducir el ruido a la mitad se tendría que haber aumentado el conteo cuatro veces más, lo cual hubiera sido totalmente impráctico, además de la poca disponibilidad de tiempo que se tenía para ello. Los resultados obtenidos corresponden esencialmente a lo esperado con el modelo teórico empleado.

De acuerdo a las geometrías del dispositivo experimental y de los meteoritos (esta última bastante irregular) se bombardeó la cara más regular de cada uno de ellos; buscando elevar la intensidad del haz de radiación reemitido en la dirección del detector.

Las dimensiones de los meteoritos estudiados iban de 3 a 14 cm aproximadamente. La técnica utilizada podría ser aplicada, en principio, a meteoritos de cualquier tamaño; no obstante, el análisis de grandes meteoritos (como los que se encuentran en la entrada del Palacio de Minería o en el Instituto de Astronomía) representaría enormes problemas para el traslado ya sea de los meteoritos o del espectrómetro, así como problemas para aislar el área del meteorito que sería analizada y evitar la radiación reemitida por otras partes del meteorito.

La radiación incidente sobre las muestras penetró alrededor de 4000-5000 angstroms, de tal manera que la información obtenida corresponde sólo a la superficie de los meteoritos. En este sentido, y de una revisión a nivel macroscópico, las muestras se presentan muy homogéneas.

A continuación se hace el estudio de cada meteorito, indicando su clasificación y características generales, su número de inventario de acuerdo al catálogo del Museo de Geología y señalando el sitio donde fue localizado. Después se presentan sus espectros Mössbauer correspondientes y se indican, en cada caso, los parámetros resultantes del ajuste hecho. En las figuras que se presentan, los puntos son datos experimentales y la línea continua es el resultado de este ajuste. En los meteoritos Cacaria, Catorce, Tule y Xiquipilco se presentan además sus respectivos espectros desglosados en sus componentes (sextetos y dobletes). En las tablas, el corrimiento isomérico δ está dado respecto al del hierro, así también, el ancho de línea Γ corresponde a las líneas 1-6 en todos los casos.

El conjunto de diez meteoritos fue dividido en dos grupos debido a resultados de carácter general obtenidos en el análisis. El Grupo I presenta óxidos de hierro y una fase superparamagnética, así como espectros y parámetros Mössbauer con diferencias notables; el Grupo II, por el contrario, presenta aleaciones hierro-níquel y con espectros y parámetros similares. Los dos grupos son los siguientes:

Grupo I: Cacaria, Catorce, Tule y Xiquipilco.

Grupo II: Bacubirito, Casas Grandes, Charcas, Chupaderos, Morito
y Santiago Papasquiario.

Grupo I

Cacaria

Octaedrita media (fragmento) de 44 grs. (número de inventario 08-745772).
Hallado en el Rancho de la Pila, Durango.

En la Fotografía 1 aparece el meteorito Cacaria, en la Fig. 1 su espectro Mössbauer y en la Fig. 2 sus componentes (dos sextetos y un doblete).



Fotografía 1. Meteorito Cacaria.

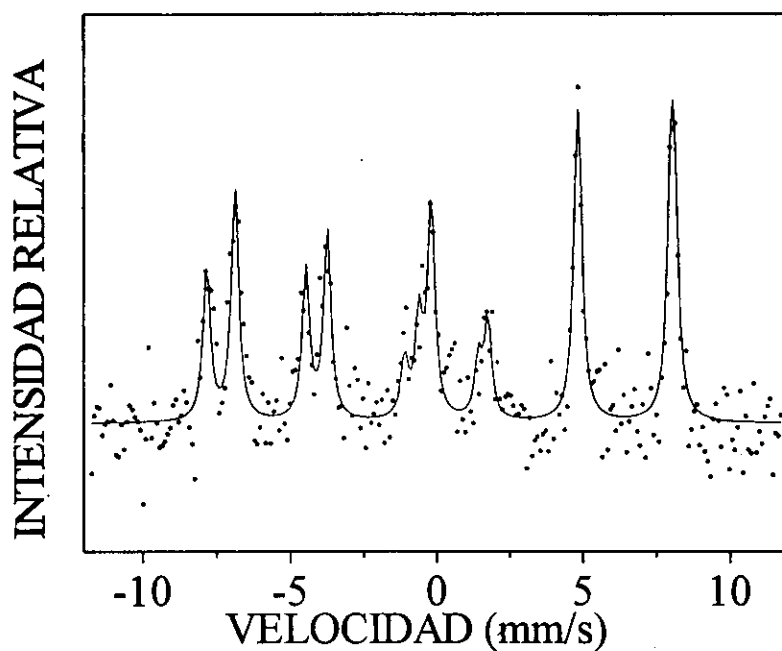


Figura 1. Espectro Mössbauer del meteorito Cacaria.

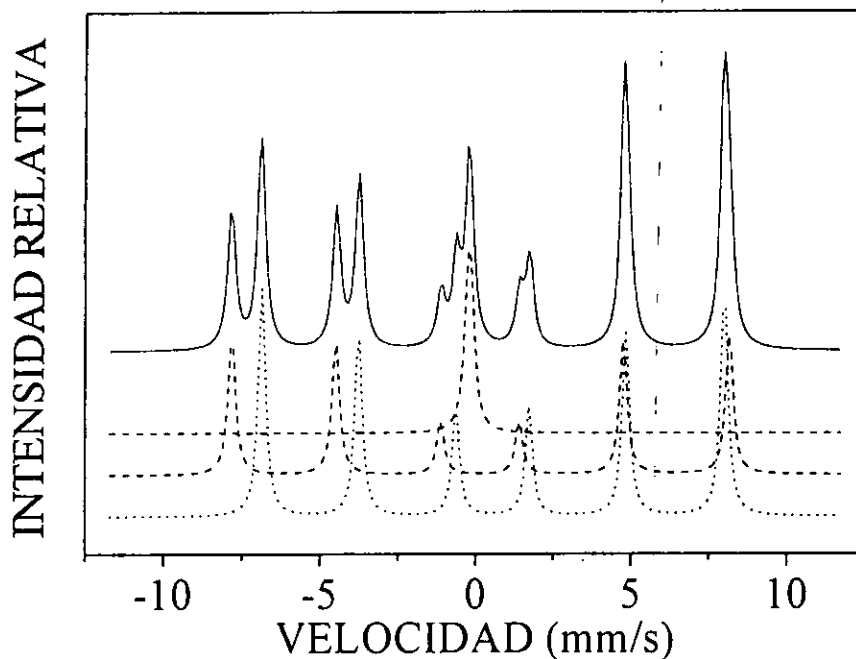


Figura 2. Componentes del espectro Mössbauer del meteorito Cacaria.

El meteorito Cacaria presenta un espectro Mössbauer con dos sextetos y un doblete. Sorprendentemente los parámetros Mössbauer de los sextetos corresponden a los reportados para los dos sitios inequivalentes de la magnetita (Fe_3O_4), la cual tiene una estructura espinel del tipo AB_2O_4 , en donde A y B son iones metálicos en sitios tetraédricos (A) y octaédricos (B) (conviene recordar que, con frecuencia, se la representa como $\text{Fe}^{3+}[\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}]\text{O}_4$ para enfatizar que los sitios B contienen igual cantidad de iones Fe^{2+} y Fe^{3+}). Lo sorprendente radica en el hecho de que en ningún meteorito metálico se ha reportado la presencia de magnetita, limitándose hasta ahora a las condritas [2,3,4]. El sexteto con 49.6 teslas corresponde a Fe^{3+} de los sitios A y B (los campos magnéticos asociados con estos dos sitios son esencialmente iguales e indistinguibles con espectroscopía Mössbauer. Para distinguirlos se requiere de la aplicación de un campo magnético externo [5,6]). El campo de 46.2 T corresponde a Fe^{2+} en los sitios B [7], de tal manera que la relación de áreas entre ambos sextetos debe ser 0.5 y en nuestro caso esta relación es de 0.7. Como se ha hecho notar, la diferencia puede deberse a impurezas o vacancias catiónicas [3,7]. El doblete observado en el espectro se debe a una fase superparamagnética de γFe^{3+} .

En la Tabla I se muestran los parámetros Mössbauer obtenidos para el meteorito Cacaria.

	δ (mm/s)	ΔQ (mm/s)	H (Teslas)	Γ_{16} (mm/s)
Sexteto I	$.32 \pm 0.009$	$.20 \pm 0.092$	49.6 ± 0.072	.28
Sexteto II	$.72 \pm 0.006$	$.16 \pm 0.062$	46.2 ± 0.047	.28
Doblete	$-.03 \pm 0.015$	$-.11 \pm 0.045$		

Tabla I. Parámetros Mössbauer del meteorito Cacaria.

Catorce

Octaedrita media de 39.6 grs. (número de inventario 08-745768). Hallado en la localidad de Potrero, San Luis Potosí. En la Fig. 3 se muestra el espectro Mössbauer de este meteorito, en la Fig. 4 se presentan los componentes (sextetos y doblete) de su espectro y en la Tabla II sus parámetros.

El meteorito Catorce presenta un espectro que consta de dos sextetos y un doblete. Los parámetros del doblete coinciden con los reportados por Madsen *et al.* [2] y ha sido asociado con una fase paramagnética Fe^{3+} . El ancho de línea anómalo de este doblete está asociado con el colapso del campo magnético por el efecto superparamagnético. Los parámetros de uno de los sextetos (el de menor campo) corresponden a una fase αFeNi . El otro sexteto, cuyo ancho de línea es muy grande, es característico de la estructura espinel $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$, aunque el campo magnético es ligeramente menor al reportado en la literatura [5]. La observación de este complejo espectro habla de un proceso de enfriamiento rápido del meteorito, que se tradujo en microcristales suficientemente pequeños como para que se presente el efecto superparamagnético. Por otra parte, el menor valor del campo magnético de la fase $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$, así como su ancho de línea anómalo, confirman que el proceso de enfriamiento de este meteorito fue rápido y que se tradujo en un efecto volumétrico que produjo una distribución de campos, la cual es responsable de este ensanchamiento anómalo. La relación de áreas de los sextetos es de 0.96.



Fotografía 2. Meteorito Catorce.

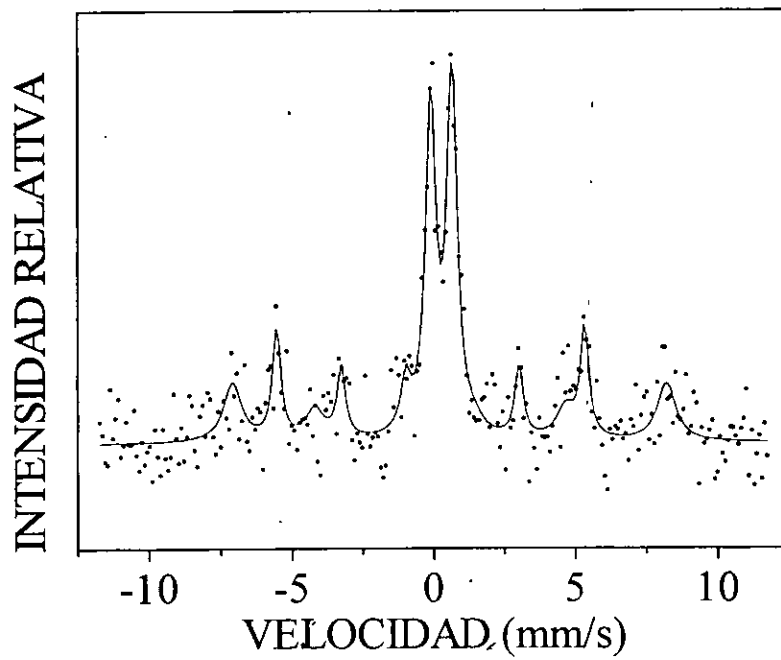


Figura 3. Espectro Mössbauer del meteorito Catorce.

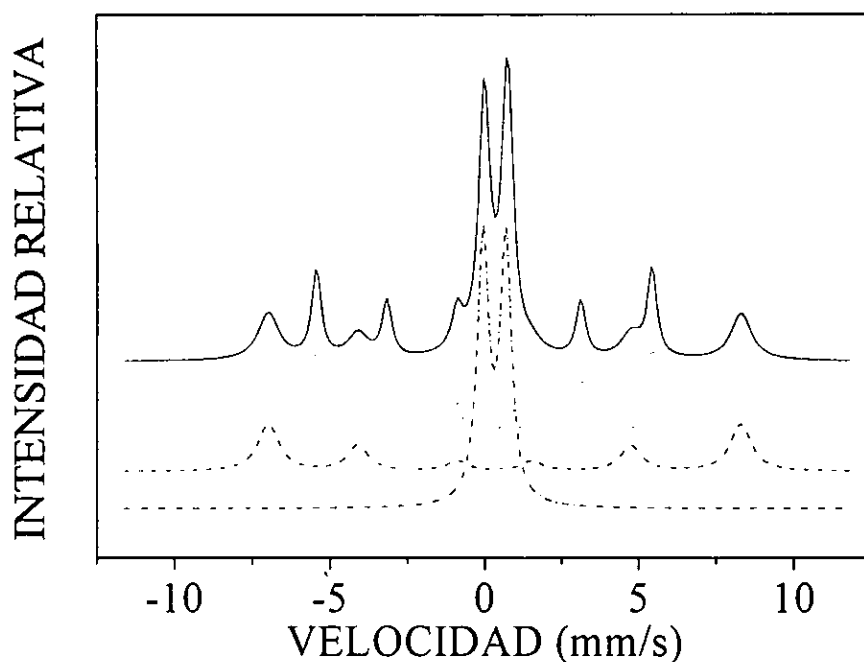


Figura 4. Componentes del espectro Mössbauer del meteorito Catorce.

	δ (mm/s)	ΔQ (mm/s)	H(teslas)	Γ_{16} (mm/s)
Sexteto I	$.51 \pm 0.052$	$.33 \pm 0.102$	47.5 ± 0.300	.8
Sexteto II	0 ± 0.016	$.01 \pm 0.031$	33.8 ± 0.106	$.36 \pm 0.048$
Doblete	$.38 \pm 0.008$	$.74 \pm 0.013$		$.43 \pm 0.020$

Tabla II. Parámetros Mössbauer del meteorito Catorce.

Tule

Octaedrita media de 49 grs. (número de inventario 08-745776). Hallado en el Rancho de Tule, Balleza, Chihuahua.

En la Fig. 5 se muestra el espectro Mössbauer del meteorito Tule y en la Fig. 6 se muestran los dos sextetos que lo componen. En la Tabla III se presentan sus correspondientes parámetros.



Fotografía 3. Meteorito Tule.

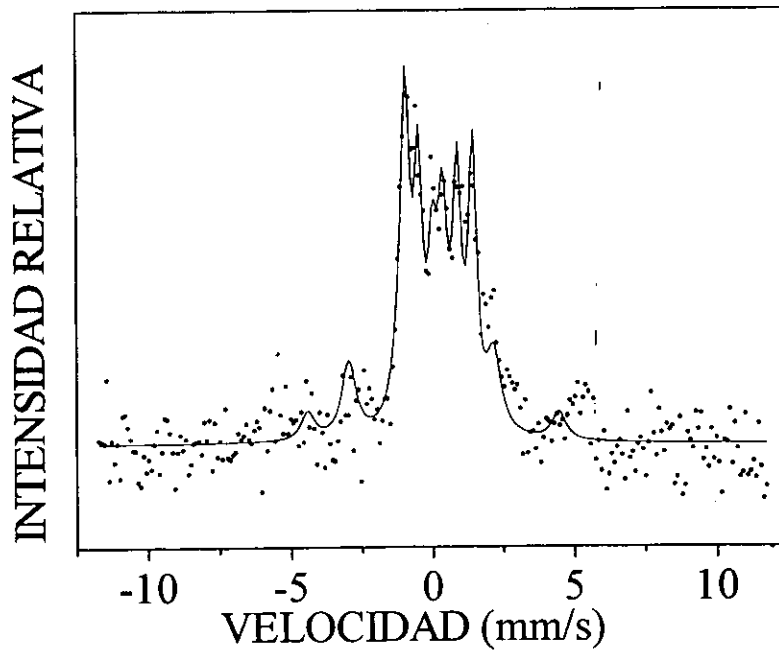


Figura 5. Espectro Mössbauer del meteorito Tule.

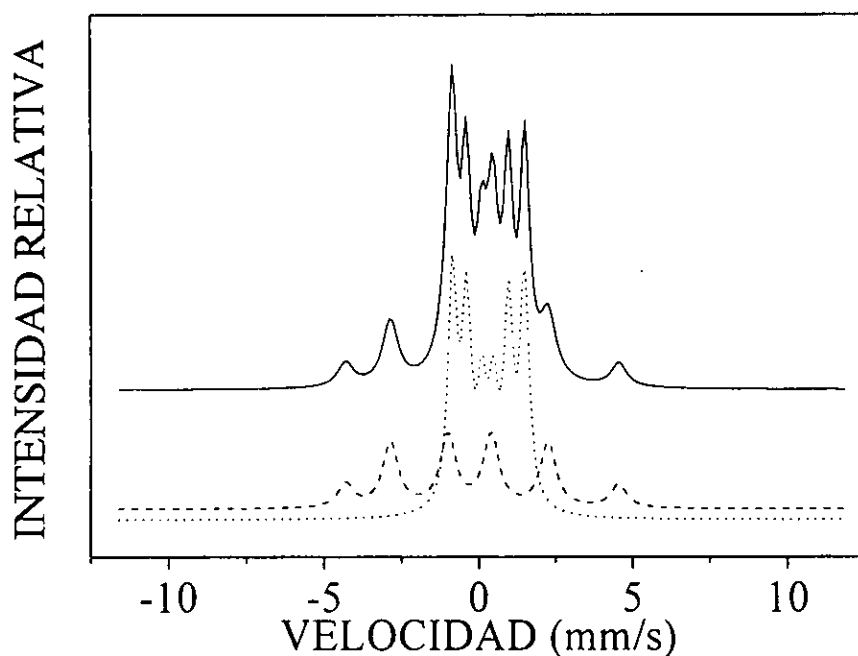


Figura 6. Los dos sextetos que componen el espectro del meteorito Tule.

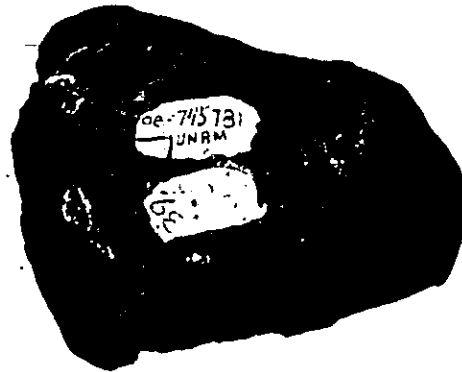
	δ (mm/s)	ΔQ (mm/s)	H (teslas)	Γ_{16} (mm/s)
Sexteto I	$-.08 \pm 0.049$	$.21 \pm 0.049$	27.5 ± 0.321	.6
Sexteto II	$.32 \pm 0.007$	$.03 \pm 0.005$	7.3 ± 0.050	.35

Tabla III. Parámetros Mössbauer del meteorito Tule.

El espectro del meteorito Tule resulta particularmente interesante, pues presenta dos sextetos con campos magnéticos muy distintos. Los parámetros del sexteto con mayor campo corresponden a una fase ordenada FeNi 50-50 (tetrataenita) con una superestructura L_{10} , que ha sido observada en muchos meteoritos [8]. El segundo sexteto tiene un campo asociado de tan sólo 7.3 teslas, el cual debe relacionarse con una relajación superparamagnética parcial de Fe^{3+} . Esto indica que el proceso de enfriamiento de este meteorito fue tal que permitió que los tamaños de grano estuvieran entre 10 y 15 nm. La relación de áreas entre los sextetos es 0.51.

Xiquipilco

Octaedrita media de 110.36 grs. (número de inventario 08-745778). Correspondiente a la lluvia meteórica observada en los alrededores del pueblo de Xiquipilco, cerca de Toluca, Estado de México.



Fotografía 4. Meteorito Xiquipilco.

En la Fig. 7 se muestra el espectro Mössbauer del meteorito Xiquipilco y en la Tabla IV sus parámetros correspondientes. En la Fig. 8 aparecen los componentes del espectro del meteorito Xiquipilco.

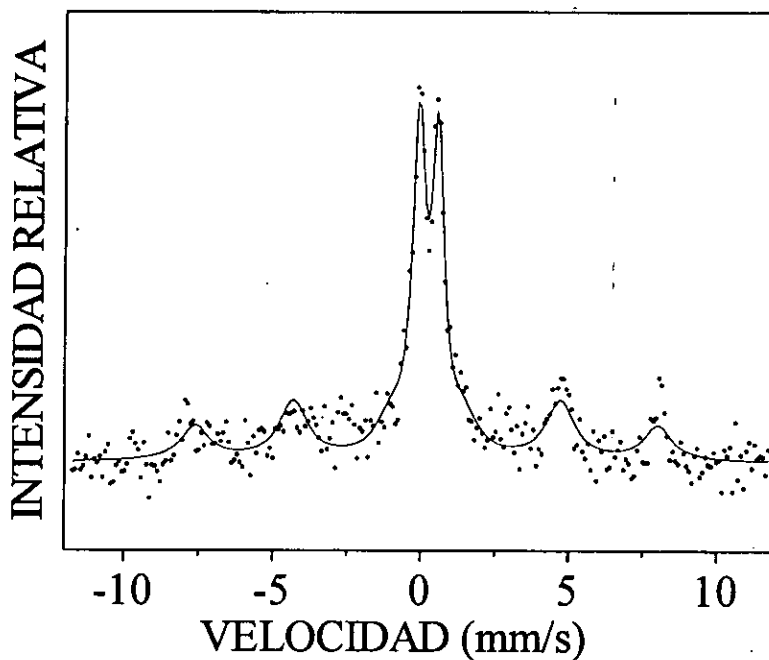


Figura 7. Espectro Mössbauer del meteorito Xiquipilco.

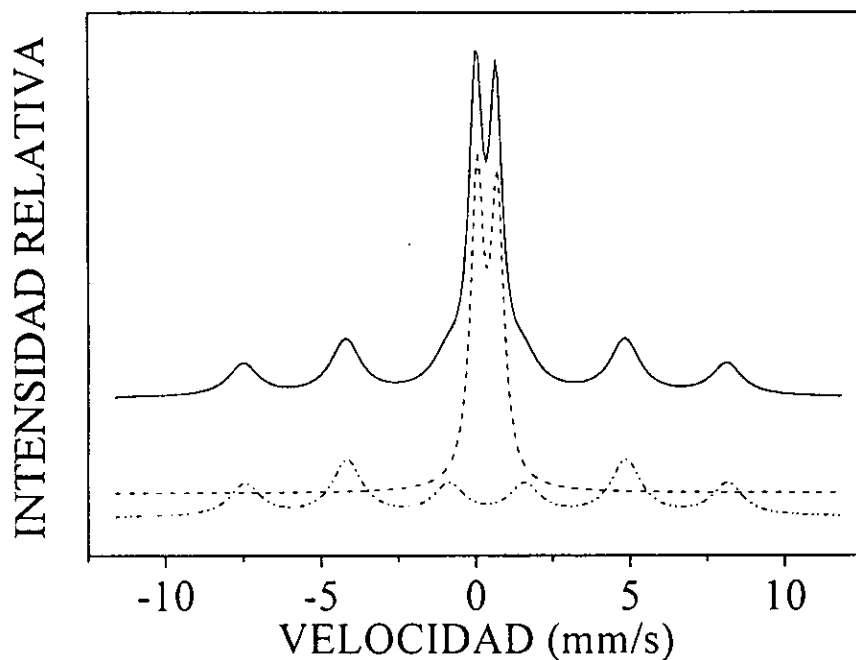


Figura 8. Doblete y sexteto que componen el espectro Mössbauer del meteorito Xiquipilco.

	δ (mm/s)	ΔQ (mm/s)	H (teslas)	Γ_{16} (mm/s)
Sexteto	$.37 \pm 0.034$	$.65 \pm 0.010$	48.5	1.16 ± 0.123
Doblete	$.38 \pm 0.006$.5

Tabla IV. Parámetros Mössbauer del meteorito Xiquipilco.

El meteorito Xiquipilco muestra un espectro Mössbauer que consta de un sexteto ensanchado y de un doblete cuadrupolar, también ensanchado. Los parámetros del sexteto corresponden aproximadamente al $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$, aunque el ancho de línea de 1.16 mm/s habla de una distribución de campos hiperfinos probablemente debida a una amorfización del meteorito causada por su rápido enfriamiento. Esto queda comprobado por la presencia del doblete cuadrupolar que, como ya se dijo, también está ensanchado, y que seguramente se debe al efecto superparamagnético de nanocristales en el meteorito.

Muestras lunares

La misión Apolo 11 arribó a la Luna el 19 de julio de 1969, regresando a la Tierra días después con los primeros 22 kg de muestras lunares. Este material fue distribuido a científicos de 9 países para su estudio y los resultados preliminares fueron publicados simultáneamente en un número especial de la revista *Science* en enero de 1970.

La posibilidad de hallar hierro en estas muestras sugirió la adopción de la espectroscopía Mössbauer como un método no destructivo de análisis. Éste, junto con estudios mineralógicos microscópicos, fueron hechos al material lunar. Es interesante ver los resultados de estos estudios, en particular los que fueron realizados a las muestras clasificadas con el número 10087,4 dado por el NASA Lunar Receiving Laboratory en Houston, Texas [19].

Las muestras señaladas con este número consisten de partículas muy finas y polvo, y dieron el espectro Mössbauer de la Fig. 9.

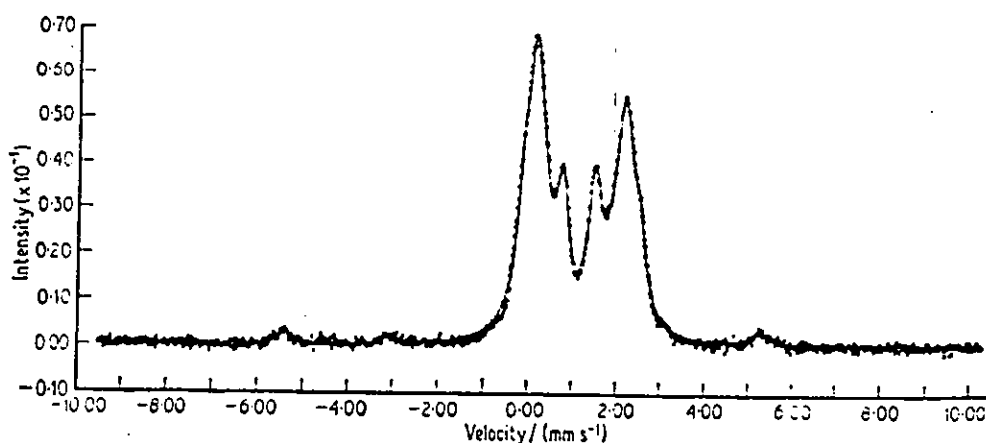


Figura 9. Espectro Mössbauer de la muestra lunar 10087,4.

El doblete cuadripolar interior es de cationes con alto espín de Fe²⁺ de ilmenita, la cual, a través de estudios mineralógicos, ha mostrado ser una

componente mayoritaria del material lunar [20]. El doblete exterior ensanchado es de alto espín Fe^{2+} en fase de silicato (incluyendo cristales de hierro-bearing y piroxenos monoclinicos). Las tres débiles resonancias bien separadas del grupo principal son tres de las líneas de hierro metálico (cerca del 5% en peso del hierro total contenido en la muestra). En algunas otras muestras se hallaron líneas débiles de troilita (FeS).

Comparando el espectro de la muestra lunar y los resultados obtenidos con los de los meteoritos del Grupo I, se encuentran varias similitudes; concretamente el contenido de Fe^{2+} . Una suposición razonable pudiera ser que este material lunar no corresponde a material propio de la Luna, sino a restos de lluvia meteórica sobre la superficie lunar.

Grupo II

Curiosamente el Grupo II, constituido por seis meteoritos (Bacubirito, Casas Grandes, Charcas, Chupaderos, Santiago Papasquiario y Morito), presenta espectros Mössbauer esencialmente iguales, con anchos de línea dentro de los límites esperados para el hierro. Dada su similitud, todos los espectros de este grupo fueron ajustados con el mismo modelo (un sexteto asimétrico con desdoblamiento cuadripolar). Las únicas diferencias observadas entre ellos son: a) variaciones pequeñas de las áreas relativas de los diferentes picos, y b) variaciones, aun más pequeñas, en los valores del corrimiento isomérico y del desdoblamiento cuadripolar. El valor del campo del campo magnético para todo el grupo es de 33.97 ± 0.18 teslas. Se asocian estos parámetros con una fase αFeNi 50-50 debido a que el desdoblamiento cuadripolar de todos los espectros de este grupo es esencialmente cero [21, 22-24].

A continuación se presentan los datos generales de clasificación y de inventario, así como las fotografías y los espectros Mössbauer, de cada uno de los meteoritos de este grupo, y al final una tabla con los parámetros correspondientes.

Bacubirito

Octaedrita muy fina de 17 grs. (número de inventario 08-745765). Forma parte de los fragmentos hallados en la localidad El Ranchito, Sinaloa.



Fotografía 5. Meteorito Bacubirito.

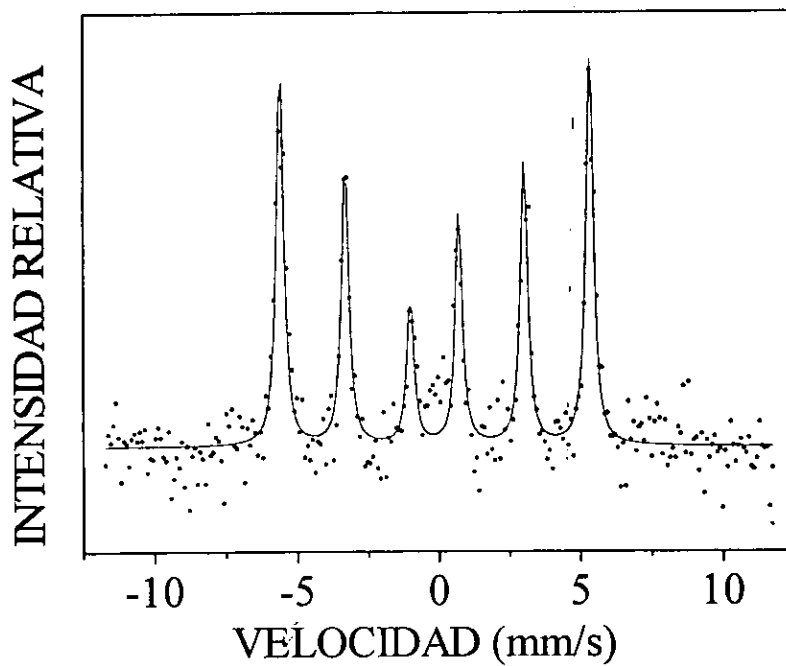


Figura 10. Espectro Mössbauer del meteorito Bacubirito.

Charcas

Octaedrita media de 11.60 grs. (número de inventario 08-745770). Hallado en la localidad de Charcas, San Luis Potosí.



Fotografía 6. Meteorito Charcas.

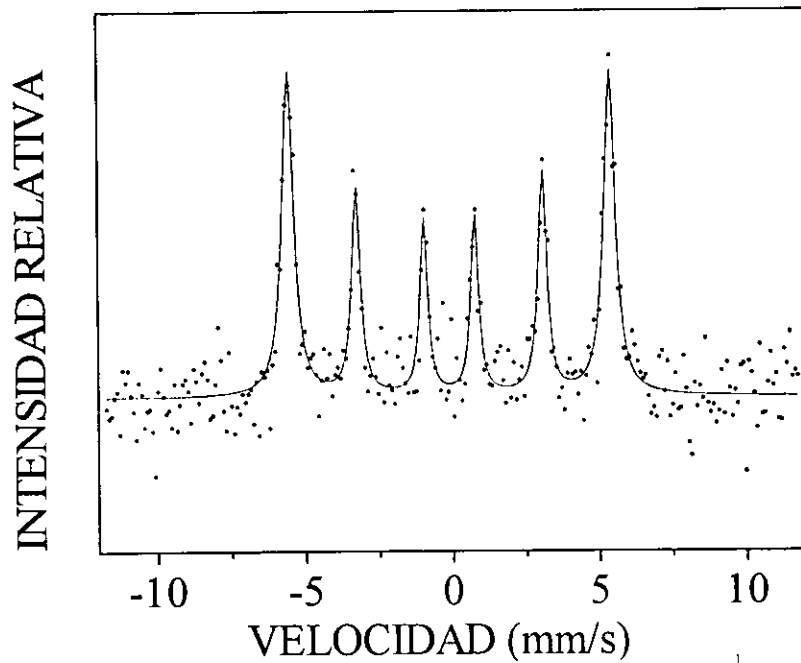


Figura 11. Espectro Mössbauer del meteorito Charcas.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Chupaderos

Octaedrita muy fina de 18.36 grs. (número de inventario 08-745767). Hallada en el Rancho de Chupaderos, Chihuahua.



Fotografía 7. Meteorito Chupaderos.

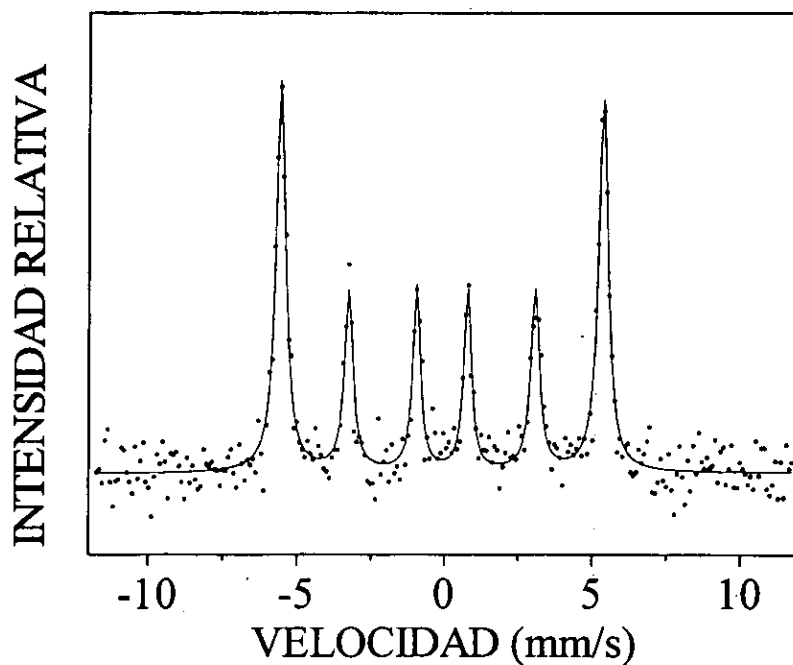
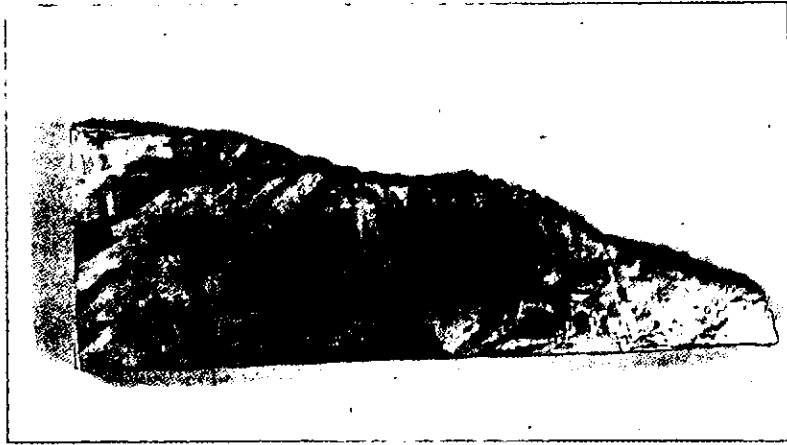


Figura 12. Espectro Mössbauer del meteorito Chupaderos.

Casas Grandes

Octaedrita media de 157.31 grs. (número de inventario 08-745777). Hallada en el sitio arqueológico de Casas Grandes, Chihuahua.



Fotografía 8. Meteorito Casas Grandes.

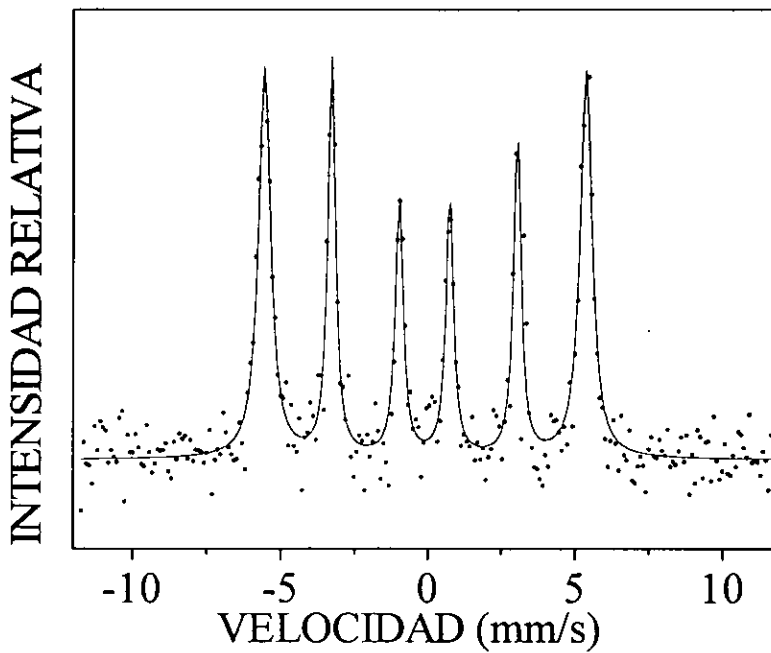
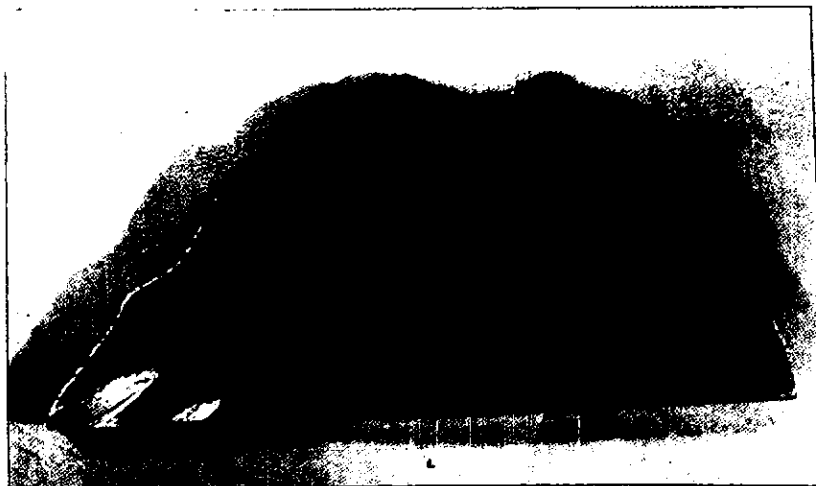


Figura 13. Espectro Mössbauer del meteorito Casas Grandes.

Santiago Papasquiario

Octaedrita de 546 grs. (número de inventario 08-745804). Perteneciente a la masa hallada al sudoeste de Santiago Papasquiario, Durango.



Fotografía 9. Meteorito Santiago Papasquiario.

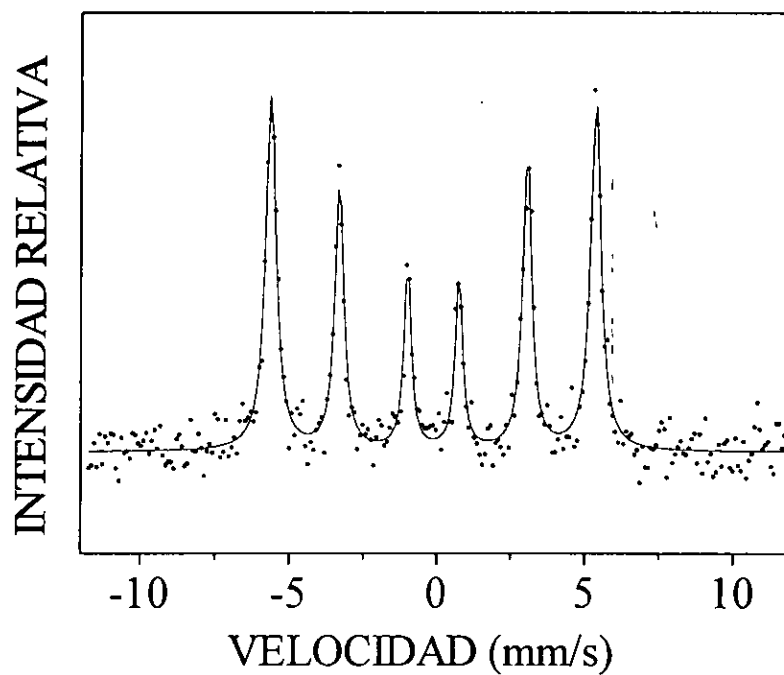
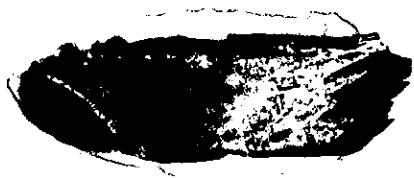


Figura 14. Espectro Mössbauer del meteorito Santiago Papasquiario.

Morito

Octaedrita media de 64.8 grs. (en tres piezas; se analizó una de las tres) (número de inventario 08-745775). No se conoce con certeza dónde fue hallado.



Fotografía 10. Meteorito Morito.

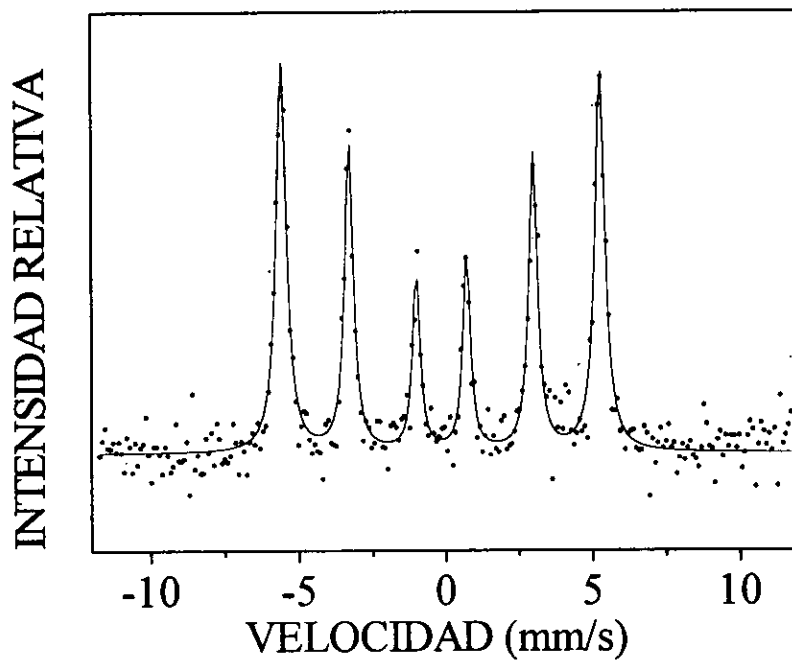


Figura 15. Espectro Mössbauer del meteorito Morito.

Meteorito	δ (mm/s)	ΔQ (mm/s)	H (teslas)	Γ_{16} (mm/s)
Bacubirito	-0.02666 ± 0.004	0.01098 ± 0.007	33.963 ± 0.027	0.32
Casas Grandes	0.02016 ± 0.004	0.03410 ± 0.008	33.985 ± 0.032	0.32
Charcas	0.01554 ± 0.004	0.00334 ± 0.009	34.029 ± 0.032	0.32
Chupaderos	0.01752 ± 0.003	-0.00624 ± 0.006	33.960 ± 0.020	0.32
Morito	-0.02934 ± 0.003	-0.00848 ± 0.005	33.719 ± 0.020	0.32
Santiago	-0.02470 ± 0.003	-0.00346 ± 0.005	34.155 ± 0.020	0.32

Tabla V. Parámetros Mössbauer de los meteoritos del Grupo II.

Los meteoritos de este grupo mostraron varias similitudes, como puede ser observado de la Tabla V. En la Tabla VI se presentan las intensidades relativas entre los sextetos de los meteoritos del Grupo II, mostrando diferencias entre ellos.

	I_1/I_T	I_2/I_T	I_3/I_T	I_4/I_T	I_5/I_T	I_6/I_T
Charcas	0.247 ± 0.021	0.137 ± 0.015	0.108 ± 0.014	0.112 ± 0.014	0.150 ± 0.015	0.246 ± 0.021
Chupaderos	0.272 ± 0.015	0.119 ± 0.010	0.114 ± 0.010	0.112 ± 0.010	0.120 ± 0.010	0.264 ± 0.015
Morito	0.236 ± 0.013	0.174 ± 0.011	0.092 ± 0.008	0.102 ± 0.008	0.166 ± 0.011	0.230 ± 0.013
Santiago	0.231 ± 0.012	0.162 ± 0.010	0.100 ± 0.008	0.095 ± 0.008	0.180 ± 0.010	0.230 ± 0.012
Casas	0.193 ± 0.004	0.187 ± 0.010	0.120 ± 0.010	0.123 ± 0.010	0.185 ± 0.004	0.191 ± 0.004
Bacubirito	0.223 ± 0.016	0.163 ± 0.014	0.085 ± 0.011	0.135 ± 0.013	0.164 ± 0.014	0.231 ± 0.016

Tabla VI. Intensidades relativas de los meteoritos del Grupo II.

Conclusiones

Una opinión muy generalizada es que los meteoritos son fragmentos de objetos del cinturón de asteroides actual [25]. Se cree que los meteoritos son objetos que se originaron en las etapas iniciales de la formación del Sistema Solar. Así, su estudio puede dar información sobre la composición y las condiciones físicas iniciales que prevalecían en la nebulosa solar hace aproximadamente 4600 millones de años. Ésta es una de las razones de la importancia del análisis realizado en este trabajo. Otra razón es que no existe, hasta el momento, un estudio de este tipo para poder caracterizar adecuadamente a los meteoritos mexicanos. Este trabajo pretende dar una aportación para el conocimiento de una parte del patrimonio científico del país, como son los meteoritos caídos en territorio mexicano.

Como una consecuencia inmediata del presente estudio se enviará un informe al Museo del Instituto de Geología de la UNAM, conteniendo los resultados obtenidos, para que además puedan ser utilizados en las exposiciones que se ofrecen al público. Adicionalmente a lo anterior tenemos planeada la preparación de uno o dos artículos para ser publicados en alguna revista especializada, nacional o extranjera.

Como se mencionó al principio de este capítulo, y debido a características generales, el conjunto de diez meteoritos fue dividido en dos grupos. El Grupo I quedó formado por los meteoritos Cacaria, Catorce, Tule y Xiquipilco, y el Grupo II por los meteoritos Bacubirito, Casas Grandes, Charcas, Chupaderos, Morito y Santiago Papasquiario.

El Grupo I resultó el más interesante, dado que sus parámetros Mössbauer corresponden a la presencia de magnetita, que hasta ahora sólo había sido reportada en las condritas. Los espectros de todos los meteoritos de este grupo indican que están presentes iones Fe^{3+} y exhiben relajación superparamagnética [2], que, como ya se dijo, se caracteriza por estar presentes nanopartículas. No obstante que los meteoritos de este grupo tienen estructuras semejantes, existen entre ellas diferencias específicas, que muy probablemente se deban al proceso que tuvo lugar durante su ingreso a la atmósfera terrestre; concretamente, cada uno de ellos debió ingresar a la atmósfera formando un ángulo diferente, con lo cual se vieron sometidos a distintos procesos de calentamiento y de presión. Otro resultado interesante de este grupo es la similitud que hay con algunas de las muestras lunares traídas de la Luna por la misión del Apolo 11.

Este primer grupo de meteoritos presenta una estructura semejante con desdoblamiento magnético hiperfino relacionado con superparamagnetismo. Éste se caracteriza porque debajo de un cierto tamaño de partículas (10-30 nm),

los espectros de sustancias ferromagnéticas y antiferromagnéticas (dependiendo del tamaño de las partículas, la distribución del tamaño de las mismas y la temperatura) son intermedios entre los espectros de sustancias magnéticas y no magnéticas; esto es, como si ellos fueran mezclas de estos dos tipos de espectros. La explicación del fenómeno del superparamagnetismo es que el movimiento térmico afecta el momento magnético de las partículas de este tamaño y éstas se comportan como un átomo grande paramagnético y se relaja [9]. Esto es particularmente importante en física del estado sólido. El espectro puede parecerse a espectros de relajación de espín, o puede ser considerado muy complejo [10]. Tales partículas están en un estado de magnetización uniforme con un momento magnético posiblemente 10^5 veces el de un simple átomo (son así “superparamagnéticas”). Para partículas suficientemente pequeñas a mayores temperaturas, el tiempo de relajamiento de los momentos magnéticos de esas partículas es más pequeño que el tiempo de precesión nuclear de Larmor, y el desdoblamiento Zeeman colapsa al espectro de dos picos característicos del estado paramagnético [11]. Como la temperatura decrece para un tamaño dado de partícula, el tiempo de relajamiento aumenta al punto donde el desdoblamiento Zeeman puede ser observado (estado ferromagnético). Cuando existe una distribución de partículas medianas (*subdomain*), como es usual, esa distribución puede ser determinada del espectro Mössbauer [11,12]. Característicamente, las partículas superparamagnéticas son menores a 30 nm, lo cual indica que el meteorito que presenta esta fase contiene una porción apreciable de hierro como Fe_3O_4 [13].

Es interesante la presencia de una componente superparamagnética en algunos meteoritos [13] y su impacto sobre el origen de las componentes orgánicas: casi con certeza, las partículas de tamaños menores que 30 nm no son el resultado de procesos de reducción de tamaño. Las partículas superparamagnéticas pueden ser producidas por precipitación de soluciones acuosas [11], condensación de vapores [14] y cristalización desde un proceso de fundición [15]. El último es diferente para una condrita carbonosa CI muy estudiada como es el meteorito Orgueil. Hay evidencia para actividad acuosa en el cuerpo principal de este meteorito [16-18], así como los de otras condritas carbonosas.

El Grupo II presentó grandes similitudes, pensándose en un principio que los meteoritos Charcas y Chupaderos, cuyos parámetros son casi iguales, podían tratarse de dos ejemplares de la misma lluvia meteórica; sin embargo, al calcular sus intensidades relativas, mostraron algunas diferencias. Por lo tanto, podríamos terminar señalando que con los estudios realizados a los meteoritos de este grupo por medio de espectroscopía Mössbauer se ha

Referencias del capítulo tres

- 1.R. Gómez G., M. Jiménez J., M.L. Marquina F. y V. Marquina F., *Introducción a la Espectroscopía Mössbauer*, Laboratorio de Física Atómica y Molecular, Departamento de Física, Facultad de Ciencias, UNAM, México (1976).
- 2.M.B. Madsen, S.M. Mørup, T.V.V. Costa, J.M. Knudsen and M. Olsen, *Nature* **321**, N. 29 (may, 1986) 501.
- 3.M.B. Madsen, S. Mørup and J.M. Knudsen, *Hyperfine Interactions*, **50** (1989) 659.
- 4.M.B. Madsen, S. Mørup, T.V.V. Costa, J.M. Knudsen and M. Olsen, *Hyperfine Interactions* **41** (1988) 827.
- 5.N.N. Greenwood and T.C. Gibb, *Mössbauer Spectroscopy*, Chapman and Hall Ltd, London (1987) p. 247.
- 6.R.J. Armstrong, A.H. Morrish, and G.A. Sawatzky, *Phys. Letters* **23** (1966) 414.
- 7.N.N. Greenwood and T.C. Gibb, *op. cit.*, p. 252.
- 8.R.B. Scorzelli, Y. Souza Azevedo, Y. Ortalli, G. Pedrazzi and A. Bonazzi, *Hyperfine Interactions*, **83** (1994) 479.
- 9.W.J. Schuele, S. Shtrikman, and D. Treves, *J. Appl. Phys.* **36** (1965) 1010.
- 10.A. Vertex, L. Korecz, and K. Burger, *Mössbauer Spectroscopy*, Elsevier Scientific Publishing Company, New York (1979) p. 96.
- 11.A.M. van der Kraan, *Phys. Stat. Sol. a* **18** (1973) 215.
- 12.W. Kundig, H. Bommel, G. Constabaris, and R.H. Lindquist, *Phys. Rev.* **142** (1966) 327.
- 13.T.J. Wdowiak and D.G. Agresti, *Nature* **311**, N. 13 (September, 1984) 140.
- 14.K. Haneda and A.H. Morrish, *Nature* **282** (1979) 186.
- 15.O. Helgason, S. Steinthorsson, S. Mørup, J. Lipka, and J.E. Knudsen, *J. Phys. Colloq.* C6 Suppl. 12, **37** (1976) 829.
- 16.J.F. Kerridge and T.E. Bunch in *Asteroids* (de. T. Gehrels), University of Arizona Press, Tucson (1979) p. 745.
- 17.T.E. Bunch and S. Chang, *Geochim. cosmochim. Acta* **44** (1980) 1543.
- 18.J.D. Macdougall, G.W. Lugmair, and F. Kerridge, *Nature* **307** (1984) 249.
- 19.N.N. Greenwood and T.C. Gibb, *op. cit.*, p. 294.
- 20.C.L. Herzenber and D.L. Riley, *Science* **167** (1970) 683.
- 21.R.B. Scorzelli, I.S. Azevedo, J. Danon and M.A. Meyers, *J. Phys. F: Met. Phys.* **17** (1987) 1993.

agotado la posibilidad de hallar diferencias estructurales entre ellos y se procederá, en un futuro inmediato, a someterlos a estudios de rayos X que puedan detectarlas.

- 22.Ch. Bötger, S.J. Campbell, E. Wu and R.G. Smith, *Hyperfine Interactions* **91** (1994) 563.
- 23.R.B. Scorzelli, R.A. Pereira, C.A.C. Peres and A.A.R. Fernandes, *Hyperfine Interactions* **94** (1994) 2343.
- 24.A. Bonazzi, K. Jiang, I. Ortalli, G. Pedrazzi and X. Zhang, *Hyperfine Interactions* **91** (1994) 541.
- 25.G.N. Netlerill and C.R. Chapman, *Meteorites and the Early Solar System*, J.F. Kerridge and M.S. Mathews (eds.), University of Arizona, Tucson (1988) p. 35.