

# A QUÍMICA DO C

*Antes de colidirem com a superfície terrestre, os meteoritos perambularam por vastas regiões do espaço, carregando consigo inumeráveis segredos sobre a formação do sistema solar. Muitas dessas rochas primitivas, com idades que chegam a bilhões de anos, retêm em sua estrutura a 'memória' química de tempos em que o Sol, os planetas e todos os outros corpos celestes ainda se formavam a partir de um aglomerado de gás e poeira. Extrair desses mensageiros do cosmo a informação para entender a evolução da galáxia é o papel da chamada cosmoquímica, uma área multidisciplinar que interage com a astrofísica, física, astrobiologia e geologia, para desvendar os principais momentos de uma história que começou muitas vezes a ser delineada nos primórdios do universo, quando as estrelas começavam a nascer.*

**María Eugenia Varela**  
Complejo Astronómico El Leoncito  
(San Juan, Argentina)

Parte (com 4 cm)  
da superfície  
polida do  
palasito Esquel

OSMO

# Segredo revelado pelos meteoritos



**O que é a cosmoquímica?** O que podemos aprender com o estudo dos meteoritos, essas rochas espaciais primitivas, tão antigas quanto o próprio sistema solar? Respondendo à primeira pergunta, apresentamos aqui o que talvez seja a mais bela definição de cosmoquímica, dada pelo pesquisador norte-americano Donald Clayton, ainda em 1982: “É a ciência que mede as propriedades da evolução química da galáxia, mediante o estudo de meteoritos nos laboratórios terrestres.”

Para compreender essa definição, devemos considerar os meteoritos como o produto final de diversos objetos que, por sua vez, foram capazes de guardar em suas ‘memórias’ diferentes momentos da história que levou à formação do sistema solar. Porém, o importante – pois isso é a base da cosmoquímica – é que a transformação química pela qual passou o sistema solar não apaga a ‘memória’ das condições químicas iniciais. Em outras palavras, nos meteoritos e demais objetos extraterrestres, permanecem características relativas ao ambiente em que eles se formaram. Basta a nós encontrá-las.

Antes de prosseguirmos, vale uma observação em relação à terminologia empregada na cosmoquímica: meteoróides é a denominação para os objetos sólidos que vagam pelo espaço. Quando eles penetram a atmosfera terrestre, são denominados meteoros. Aqueles que chegam ao solo – muitos são completamente ‘queimados’ na queda – passam a ser chamados meteoritos.

Figura 1. Abundância dos elementos químicos nos condritos carbonáceos (CI) e na fotosfera solar. As abundâncias são idênticas nesses dois meios

## Grande segredo

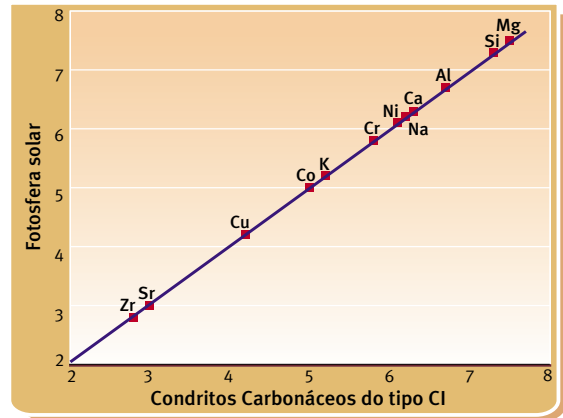
Como se determina a abundância dos elementos químicos no Sol? Essa estrela representa 99,9% da matéria do sistema solar. Portanto, uma boa análise da composição global do Sol é tudo o que precisamos para determinar uma média das abundâncias dos elementos químicos do sistema solar. Os dados da fotosfera solar (camada da estrela onde tem origem a radiação visível) são os que fornecem a informação mais confiável. Mas, para muitos elementos químicos, essas análises são muito difíceis; para outros, quase impossíveis.

Nesse aspecto, os meteoritos têm um grande segredo a revelar. Entre todos os materiais conhecidos, há uma classe especial de meteorito, os chamados condritos, que apresenta uma composição quase idêntica à da fotosfera solar (figura 1) – condritos (CI) estão entre os meteoritos mais primitivos. Portanto, o estudo desses meteoritos permite determinar a composição química do Sol com base na análise de rochas em laboratórios terrestres.

Os meteoritos não contêm apenas as evidências mais precisas das abundâncias relativas dos elementos químicos não voláteis. Eles também são um registro único do chamado fracionamento químico – conceito que discutiremos mais adiante – durante a formação dos corpos sólidos ao longo da evolução do sistema solar.

## De onde vêm os elementos?

Mas onde e como se produzem os elementos químicos? Em 1956, o químico austríaco Hans Suess (1909-1993) e o norte-americano Harold Urey (1893-1981) estimaram a abundância de núclídeos (toda espécie nuclear caracterizada por um número de prótons e nêutrons) no sistema solar primordial e perceberam a necessidade de se invocar vários processos nucleares para entender a produção dos elementos químicos. Um ano depois, em um artigo muito importante, os britânicos Margaret Burbidge, Geoffrey Burbidge e Fred Hoyle (1915-2001), bem como o norte-americano William Fowler (1911-1995), deram uma explicação para as diferentes abundâncias dos elementos. Essa teoria (que ficou conhecida como ‘B2FH’, letras iniciais dos sobrenomes dos autores) indica que são os diversos tipos de estrelas, em diferentes momentos da evolução delas, que fabricam a maioria dos elementos químicos, a partir do hidrogênio, por meio de reações nucleares.



CEIDIO PELAUTORA

Nos primeiros momentos depois do *Big Bang* (a ‘explosão’ que deu início ao universo), foram gerados os elementos químicos mais leves, como o hidrogênio, o hélio e o lítio 7 (este último tendo o núcleo formado por três prótons e quatro nêutrons). Os demais, mais pesados, foram produzidos progressivamente no interior das estrelas.

De forma muito resumida, o processo de formação dos elementos químicos é o seguinte: a estrela consome o combustível nuclear para repor a energia que perde por radiação. Uma vez que o combustível nuclear se acaba, a estrela passa a se contrair. Essa contínua contração dá lugar a uma nova fase de ignição do núcleo estelar. Esse processo se repete, porém em uma escala de tempo menor que a da etapa anterior. E, a cada um desses ciclos de ignição, as temperaturas aumentam. Dessa forma, as estrelas produzem os elementos químicos.

O combustível principal das estrelas é o hidrogênio. As primeiras reações levam à fusão do hidrogênio (H) em hélio (He) e deste em carbono (C). As estrelas de pequena massa não vão além dessa fase de evolução. Nas de massa intermediária, cria-se o oxigênio (O), o neônio (Ne), bem como um conjunto de elementos intermediários. Nas de maior massa (por exemplo, aquelas que têm, pelo menos, nove vezes a massa solar), produzem-se os elementos até o ferro (Fe).

Os elementos mais pesados que o ferro são produzidos por dois processos diferentes, denominados ‘r’ (do inglês, *rapid*, ou seja, rápido), que ocorre nas supernovas (estrelas que explodem ao final da vida), e ‘s’ (*slow*, lento em inglês), que acontece em estrelas do tipo gigantes vermelhas (figura 2).

Além das supernovas, as gigantes vermelhas, ao atingirem o final do ciclo nuclear, lançam gás e poeira para o meio interestelar. Essa matéria ejetada se condensa em grãos sólidos, que guardam em suas ‘memórias’ as diferentes etapas pelas quais passou a estrela-fonte. A partir desse conjunto de gás e poeira, irão se formar novas estrelas, como foi o caso do Sol, que tem origem em uma massa de gás

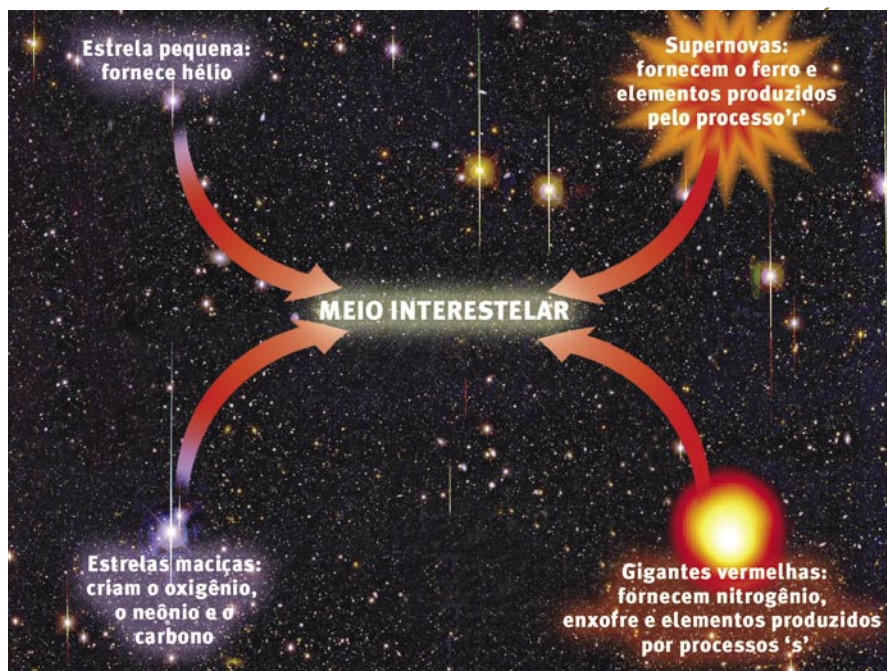
e poeira denominada nebulosa solar. Esta, por sua vez, recebeu contribuição de matéria de um grande número de estrelas que existiram antes do Sol, cuja idade é estimada em cerca de 4,5 bilhões de anos.

## Massas fracionadas

Passemos, agora, a uma breve introdução sobre o átomo, cuja massa está concentrada no núcleo, que, por sua vez, é formado por prótons (que têm carga elétrica positiva) e nêutrons (sem carga elétrica). Ao redor do núcleo, há uma nuvem de elétrons (carga elétrica negativa), que são as partículas responsáveis pelas propriedades químicas dos elementos. Cada elemento químico tem um número de prótons (que é igual ao de elétrons, caso o átomo esteja em seu estado neutro) que o faz ocupar uma posição específica na tabela periódica. Quando alteramos o número de prótons, passamos a outros elementos nessa tabela.

Mas o que acontece se mudarmos o número de nêutrons de um elemento? Nesse caso, obtemos os isótopos dele. Em outras palavras, temos o mesmo elemento químico (porque o número de prótons não variou), mas com uma massa atômica diferente, porque o número de nêutrons se alterou. Por exemplo, o deutério (um próton e um nêutron no núcleo) e o trítio (um próton e dois nêutrons) são isótopos do hidrogênio, cujo núcleo é formado por um só próton.

O estudo das pequenas variações das massas dos isótopos (o chamado fracionamento de massas) é outra ferramenta empregada pela cosmoquímica para extrair de um meteorito sua 'memória' química.



Tomemos como exemplo o oxigênio, já que ele é o principal elemento que forma rochas e água.

O oxigênio tem três isótopos estáveis:  $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$  e  $^{18}\text{O}$  (o número acima do símbolo do elemento se refere à massa atômica, ou seja, à soma dos prótons e nêutrons nesses núcleos). Eles estão presentes na água do oceano, respectivamente, na relação 99,76: 0,037: 0,204. Mas processos como a evaporação, a condensação, entre outros, podem alterar essa proporção. Ou seja, levam a um fracionamento de suas massas.

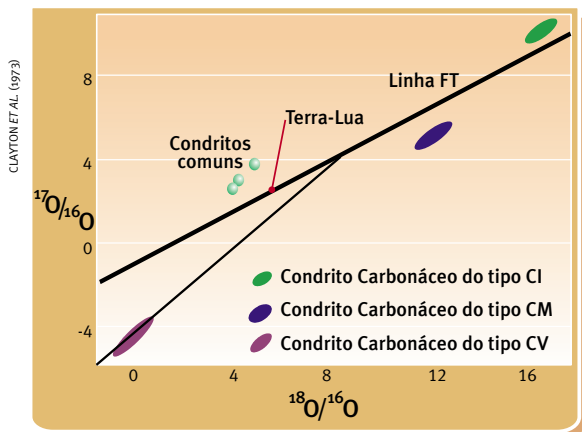
Um exemplo de um processo de fracionamento de massa ocorre na evaporação dos líquidos, como a água. Se levarmos a água à ebulição, as moléculas mais pesadas ficam no líquido, enquanto as mais leves passam ao vapor. O líquido residual estará, portanto, enriquecido pelos isótopos mais pesados ( $^{17}\text{O}$  e  $^{18}\text{O}$ ); e o vapor, pelo mais leve ( $^{16}\text{O}$ ).

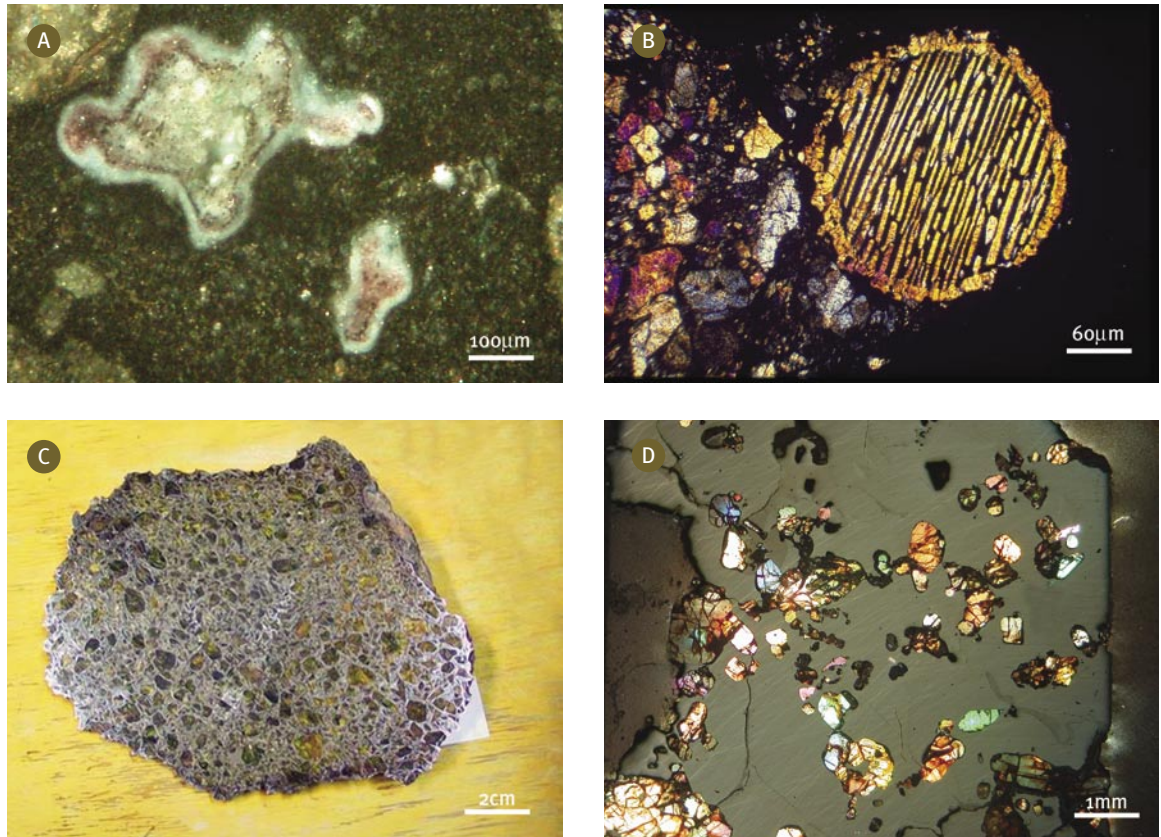
Figura 2. Contribuição dos vários tipos de estrelas para a síntese dos elementos químicos encontrados no meio interestelar

## Mensagem da nebulosa

Na superfície da Terra, a relação dos isótopos de oxigênio, em praticamente todos os materiais que contêm esse elemento (rochas, águas etc.), se ajusta a uma reta denominada fracionamento terrestre, mais conhecida pela sigla 'FT'. Se levarmos em conta que todos os objetos rochosos (incluindo meteoritos e até os planetas) se formaram do material da nebulosa solar, é de se esperar que qualquer objeto rochoso (rochas terrestres e meteoritos) se ajuste a essa reta de fracionamento do oxigênio (figura 3). Essa era a linha dominante de pensamento na década de 1960, quando se acreditava que a nebulosa solar era homogênea em qualquer direção em que fosse observada (ou, no jargão da cosmoquímica, isotopicamente

Figura 3. Distribuição dos três isótopos do oxigênio nos meteoritos condriticos e a comparação desta com a linha de fracionamento terrestre (FT), baseada em dados de Clayton, de 1973





FOTOS CEDIADAS PELA AUTORA

Figura 4. Os diferentes tipos de meteoritos, bem como os objetos incrustados neles, nos dão informação sobre a formação e a evolução da nebulosa solar. Em A, imagem feita por microscópio óptico de duas inclusões ricas em cálcio (Ca) e alumínio (Al) do meteorito Allende. As inclusões representam um dos primeiros objetos a se formar nessa nebulosa. Em B, imagem obtida por microscópio óptico de uma côndrula, em forma de barra, do condrito Mezó-Madaras (L3.7). Sua presença levanta a questão sobre a presença de líquidos nos instantes iniciais da formação do sistema solar. Em C, o meteorito Eagle Station, do tipo palasito, pertencente à coleção do Museu de História Natural, em Viena, consiste em cristais de olivina incrustados em metal, o que levanta a questão sobre como permaneceriam juntos materiais de densidades tão diferentes. Em D, microfotografia do meteorito de ferro Udei Station (IAB), encontrado em 1927, no rio Benue (Nigéria). Na imagem, observam-se cristais perfeitos de silicatos (no caso, objetos coloridos brilhantes) incrustados no metal

homogênea), pois seu material estava completamente quente, vaporizado e bem misturado.

Porém, em 1973, veio a surpresa. Naquele ano, uma evidência clara e indiscutível foi encontrada por Clayton e colegas. A composição dos isótopos do oxigênio nos minerais presentes no meteorito Allende (um condrito carbonáceo do tipo CV) mostrou uma relação que não se ajustava à linha FT. Foi uma prova irrefutável da presença de diferentes reservatórios de oxigênio na nebulosa solar.

Novamente, os meteoritos nos revelaram outros de seus segredos bem guardados: a nebulosa solar não estava bem misturada. Isso significa que cada tipo de meteorito se formou em um reservatório diferente. Mais importante: esses objetos celestes são capazes de guardar, em suas 'memórias' químicas, todas as características do ambiente em que se formaram.

Os diversos objetos incluídos nos meteoritos (figura 4) – como as esferas perfeitas chamadas

côndrulos ou as inclusões refratárias, bem como os distintos tipos de meteoritos (os de ferro, os mistos e os micrometeoritos, sendo estes últimos a matéria extraterrestre mais abundante que recebemos), todos eles nos fornecem mensagens sobre como se formou e evoluiu a nebulosa solar.

Mas essa é uma história que fica para outra ocasião.

## Grãos pré-solares

Outro grande segredo estava guardado nos meteoritos. Até pouco tempo atrás, toda a informação sobre a poeira interestelar era obtida por observações astronômicas. Hoje, sabemos que as diferentes estrelas produzem vários elementos químicos com diversas relações entre os isótopos, e que o sistema solar é

uma mistura de material proveniente de várias fontes estelares. Porém, na década de 1960, acreditava-se que o material da nebulosa solar havia perdido a 'memória' de processos anteriores a ela.

Nas últimas décadas, porém, se identificou uma nova fonte de informação sobre a poeira interestelar: os grãos pré-solares. Esses grãos estavam bem protegidos e resguardados em alguns meteoritos e foram encontrados, depois de 20 anos de pesquisa, com base em uma pequena pista: o conteúdo anômalo deles em relação a determinados gases.

Gerou-se um grande entusiasmo ao se saber que havia pequenos objetos incrustados nos meteoritos que podiam guardar informação sobre o material a partir do qual o sistema solar se formou. Mas os grãos pré-solares resultaram ser uma surpresa ainda maior: eles não só preservam as anomalias isotópicas, como também eles mesmos são uma amostra de estrelas mais antigas que o Sol. Portanto, os meteoritos primitivos, formados há cerca de 4,5 bilhões de anos, guardam 'pedacinhos' de estrelas que viveram e morreram antes do Sol (figura 5).

## Pedacinhos de estrelas

Mas como saber que essa matéria é pré-solar? Como o material que forma os meteoritos foi processado na 'infância' do sistema solar, ele nos dará informação sobre os processos ocorridos a partir desse momento inicial (há cerca de 4,5 bilhões de anos). Porém, os grãos pré-solares apresentam características únicas que não podem ser explicadas por processos solares.

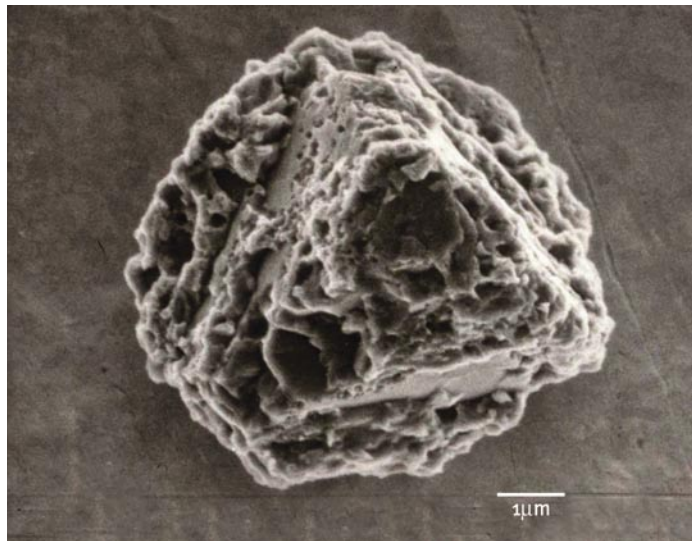


Figura 5. Microfotografia obtida por microscópio eletrônico de um grão pré-solar de carbureto de silício (SiC) isolado do meteorito Murchison (CM), um condrito carbonáceo

## PARA ENTENDER A FORMAÇÃO DOS METEORITOS

A autora se dedica ao estudo da petrologia e da química de meteoritos condriticos e acondriticos (ou seja, sem a presença de côndrulos) para entender a formação desses objetos celestes. Seu interesse, cujo foco são os vidros presentes em todos os meteoritos, lhe permite elaborar um novo modelo de formação para o material extraterrestre. Para isso, aplica técnicas modernas como microscopia eletrônica de varredura, microsonda eletrônica, microsonda iônica, microsonda nuclear, bem como a espectroscopia Mössbauer.

Essas pesquisas se dão em associação com grupos da França, Alemanha, Áustria e dos Estados Unidos. Com o Brasil, a autora mantém estreita colaboração com o Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS), em Campinas (SP), e especialmente com o grupo da pesquisadora Rosa Scorzelli, do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), no Rio de Janeiro (RJ), com os quais se estabeleceu um acordo internacional destinado a promover e impulsionar o estudo de materiais extraterrestres em países do Mercosul.

A formação dos grãos pré-solares ocorre quando as temperaturas tanto nas camadas superiores das estrelas gigantes vermelhas quanto na matéria ejetada pelas supernovas são suficientemente baixas, a ponto de permitir a condensação de minerais. A composição isotópica de qualquer grão pré-solar reflete a da atmosfera estelar em que o grão se condensou. Portanto, esses diminutos objetos guardam a informação dos processos ocorridos em suas estrelas-fonte e, além disso, eles vêm sobrevivendo, sem se alterar quimicamente, sendo protegidos, na estrutura dos meteoritos, dos processos que ocorreram antes e depois da formação do sistema solar.

Esse descobrimento abriu um caminho muito frutífero que relaciona a ciência de meteoritos com a astrofísica e a física. A explicação para a abundância dos elementos no sistema solar requer não só considerar que houve contribuição de grãos de cada estrela da galáxia, mas também aceitar que as próprias estrelas que existiram antes do Sol incorporaram, ao longo da evolução química da galáxia, material ejetado por gerações anteriores a elas.

A cosmoquímica está em constante evolução, e seus modelos se adaptam aos novos dados que os meteoritos, como testemunhas privilegiadas dos primeiros instantes da formação do sistema solar, nos vão aos poucos entregando. ■

### SUGESTÕES PARA LEITURA

- CLAYTON, R., GROSSMAN, L. TOSHIKO, M. 'A Component of Primitive Nuclear Composition in Carbonaceous Meteorites'. In: *Science*, v. 182, pp. 485-488 (1973).
- BURBIDGE, G., FOWLER, W. e HOYLE, F. 'Synthesis of the elements in Stars', *Review of Modern Physics*, v. 29, pp. 547-650 (1957).
- MUSÉUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE. *Les Météorites* (Bordas, Paris, 1996).
- SCORZELLI, R. 'Mensageiros do espaço'. In: *CBPF - Na vanguarda da pesquisa*, pp. 25-28, 2002. Disponível (em formato PDF) em <http://portal.cbpf.br/protected/Pages/divulgacao/pdfs/Meteoritica.pdf>.