

ASTRONAUTAS CÓSMICOS

UM GUIA PARA QUEM QUER SABER MAIS SOBRE METEORITOS



SUMÁRIO

- 2** Apresentação
- 3** Agradecimentos
- 4** Do Big-Bang ao Sistema Solar
- 8** Meteoritos e suas classificações
- 8** Condritos
- 9** Acondritos
- 11** Ferro-rochosos
- 11** Ferrosos
- 12** Astrobiologia e origem da vida
- 17** Como estudar os meteoritos
- 20** Experimentos para fazer em aula ou em casa
- 21** Glossário
- 22** Bibliografia e Imagens

Revista de divulgação científica elaborada a partir de pesquisa preliminar do Trabalho de Conclusão de Curso "Estudo das Concepções dos Estudantes do Ensino Fundamental sobre Astronomia, Meteorítica e Astrobiologia e uma Proposta de Material Didático".
Edição e texto: Carolina Targón Tiberio
Edição para impressão: Daniel Guglielmetti Da Glia
Contato: carolina.tati14@gmail.com
Universidade Federal de São Carlos - UFSCar
1ª edição: mar/2023



Apresentação

Esta revista é o resultado final do Trabalho de Conclusão de Curso intitulado "Estudo das percepções dos estudantes do Ensino Fundamental sobre Astronomia, Meteorítica e Astrobiologia e uma proposta de material didático" elaborada pela graduanda Carolina Targon Tiberio e orientada pela Prof^a Dra^a Denise de Freitas e Dr. Gabriel Gonçalves Silva cujo propósito é contribuir para a complementação dos saberes educacionais em astronomia nos anos finais do Ensino Fundamental. Aqui serão apresentados alguns conceitos sobre a origem do universo, formação do Sistema Solar, composição e classificação dos meteoritos e as principais linhas de pesquisa da astrobiologia moderna, todos fundamentados nas teorias científicas atualizadas e aceitas pela comunidade científica na data de apresentação.

Os meteoritos da coleção do Observatório Astronômico da UFSCar foram os principais precursores para que este material existisse, pois, a ideia inicial era que ele pudesse servir como um guia ilustrado para visitantes do observatório que quisessem saber mais sobre a origem e as características das pedras que ali estão em exposição. A maior parte dos meteoritos mostrados aqui são exemplares da coleção do observatório astronômico da UFSCar.

Os temas da revista surgiram a partir de entrevistas com 26 alunos provenientes de 3 escolas diferentes do município de São Carlos - SP. Durante as entrevistas foram coletados dados sobre as concepções prévias desses estudantes com relação aos temas astronomia, meteorítica e astrobiologia e, a partir da análise destes dados, os conteúdos presentes neste trabalho foram elaborados afim de construir um material didático complementar ao material oficial, estando de acordo com a abordagem da aprendizagem significativa.

Por fim, este material apenas deseja contribuir com a complementação das aulas elaboradas pelos professores que queiram aprofundar os conteúdos de astronomia nas suas salas de aula ou servir de fomento à curiosidade de qualquer leitor que esteja em contato com ele neste exato momento.

Uma boa leitura à todes.

Agradecimentos

Agradeço à Profa. Dra. Denise de Freitas por ter aceitado me orientar neste trabalho, ao Dr. Gabriel Gonçalves Silva por me guiar e me acolher neste processo de me aprofundar no mundo dos meteoritos e da astrobiologia. Agradeço ao prof. Dr. Marcelo Adorna Fernandes por ter me apoiado durante a jornada e aceitado participar da banca de defesa. Agradeço às escolas da rede pública de São Carlos que abriram as suas portas para que eu pudesse fazer a pesquisa com os seus estudantes e agradeço aos estudantes que aceitaram participar voluntariamente deste trabalho. Agradeço também aos coordenadores do observatório astronômico da UFSCar, Prof. Dr. Marlon Pessanha e Prof. Dr. Raphael Santarelli, por terem cedido os meteoritos da coleção do observatório para que eu pudesse utiliza-los ao longo desse trabalho.

DO BIG BANG AO SISTEMA SOLAR

Em 1826, o astrônomo e médico Heinrich Wilhelm Matthäus Olbers, havia questionado o porquê do céu noturno ser tão escuro. Esta questão já era antiga para os pensadores mais antigos, mas ficaria conhecida como paradoxo de Olbers. E porque isto era importante?

A questão é a seguinte: imagine-se em uma floresta. Dentro da floresta, você consegue distinguir as distâncias em que as árvores mais próximas a você estão umas das outras. À medida que você olha mais longe, as árvores mais distantes parecem cada vez mais perto uma das outras, ao passo que não se pode mais distinguir o que está além delas. Agora aplique este raciocínio ao olhar para o céu noturno. Se o universo é infinito, à medida que olhamos cada vez mais longe, as estrelas mais distantes estariam cada vez mais próximas, ao nosso olhar, até formar um céu totalmente coberto por estrelas. Sabemos que isso não acontece, mas por quê?

Uma das respostas científicas para esta questão foi a proposição de que o universo teve um início um dia. Se o universo tem uma idade finita, e a luz tem uma velocidade finita, então, a luz das estrelas mais longes de nós não teve tempo para chegar aqui ainda, por isso não as vemos. Portanto, a escuridão é uma prova de que o universo teve um início.

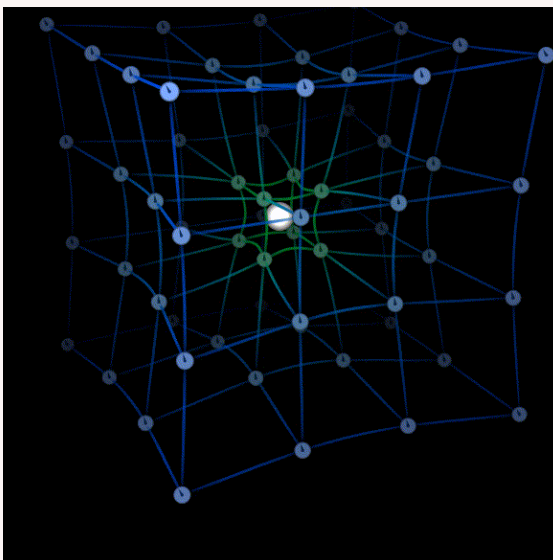


Figura 1: Heinrich Wilhelm Matthäus Olbers

Alguns séculos mais tarde, em 1915, Albert Einstein propôs a famosa **teoria da relatividade geral**, que mudaria os rumos da física moderna, mas, para além disso, ela também iria prever que o universo teve um início e provavelmente terá um fim. Na época em que propôs sua teoria, Einstein não presumia que o universo estava se expandindo, na verdade ele tentava fugir tanto dessa questão que chegou a introduzir nas equações da relatividade geral um fator chamado "constante cosmológica" para tornar o universo estático em sua teoria. O fato de que o universo se expandia só foi confirmado após as publicações de Edwin Hubble na década de 1920.

Nota: Palavras em rosa estão descritas no glossário (página 21).

Figura 2: Distorção do tecido espaço-tempo em 3D

Em 1929, Hubble não só conseguiu medir as distâncias que as galáxias vizinhas estavam de nós, mas também a qual velocidade que elas se distanciavam utilizando as medidas do **brilho aparente** das estrelas que chegavam aos nossos olhos e comparando com o **brilho real** delas. A constatação de Hubble pôs em evidência um outro fator: se realmente o universo está se expandindo, é porque um dia ele já esteve mais próximo. Na verdade, alguns anos antes, Alexander Friedmann já havia previsto, a partir da relatividade geral, que não poderíamos esperar que o universo fosse tão estático assim, mas, antes da descoberta de Hubble a ideia de um universo estático era demasiada forte para ser questionada sem evidências sólidas.

A escuridão do céu noturno é um forte indício de que o universo teve um início.

Em 1927, o padre, engenheiro civil e cosmólogo belga Georges-Henri Édouard Lemaître foi, provavelmente, o primeiro a propor um modelo específico para o Big Bang. Ele imaginou que, em um passado remoto, toda a matéria em expansão estivesse concentrada no que ele chamou de "átomo primordial", e que com o evento da expansão, esse átomo se partiu em incontáveis pedaços formando os átomos atuais.

Sabemos que este modelo não é o mais correto, pois não obedece às leis da relatividade, mas ele inspirou os modelos modernos baseados nas soluções para a relatividade geral encontradas por Friedmann.

Em 1950, com a ideia já consolidada de que o universo



Figura 3: Edwin Hubble

teve um começo, Fred Hoyle sugeriu, em uma brincadeira, o nome "Big Bang" ou "Grande expansão" para o evento do início do universo. Ele também sugeriu o nome "Big Crunch" para o possível colapso quando ele futuramente parar de expandir e começar a contrair de novo. Há controvérsias sobre qual será o destino do universo dentro do campo de estudo da física, mas isso é assunto para a cosmologia moderna resolver.

Em 1964, a descoberta acidental da radiação de micro-ondas do fundo do universo pelos dois radio astrônomos Arno Allan Penzias e Robert Woodrow Wilson reforçou a teoria do big bang. A **radiação cósmica de fundo** é o sinal eletromagnético das regiões mais distantes do universo (cerca de 13,5 bilhões de **anos-luz**).

Acredita-se que antes do Big Bang o universo possuía tamanho zero e temperatura infinita.

Assim que a expansão começou, estima-se que a temperatura

decreceu em uma ordem de 10 bilhões de graus Kelvin no primeiro segundo. Na época, haveria apenas alguns tipos de partículas como fótons, elétrons, alguns prótons e nêutrons, neutrinos e suas antipartículas. Após cem segundos a temperatura teria caído para um bilhão de graus, o equivalente à temperatura do núcleo das estrelas mais quentes atuais. Nessa temperatura teriam começado a se formar os núcleos de hidrogênio e hélio por **fusão nuclear**.

Nas horas seguintes, a formação massiva de hidrogênio e hélio teria cessado, ocorrendo atualmente somente no núcleo de estrelas. No milhão de anos seguintes o universo teria somente se expandido, sem que algo de novo tivesse acontecido. Algumas regiões mais densas que outras voltaram a se condensar de forma a levar à formação de **galáxias espirais**, estrelas e sistemas solares devido à rotação da matéria.

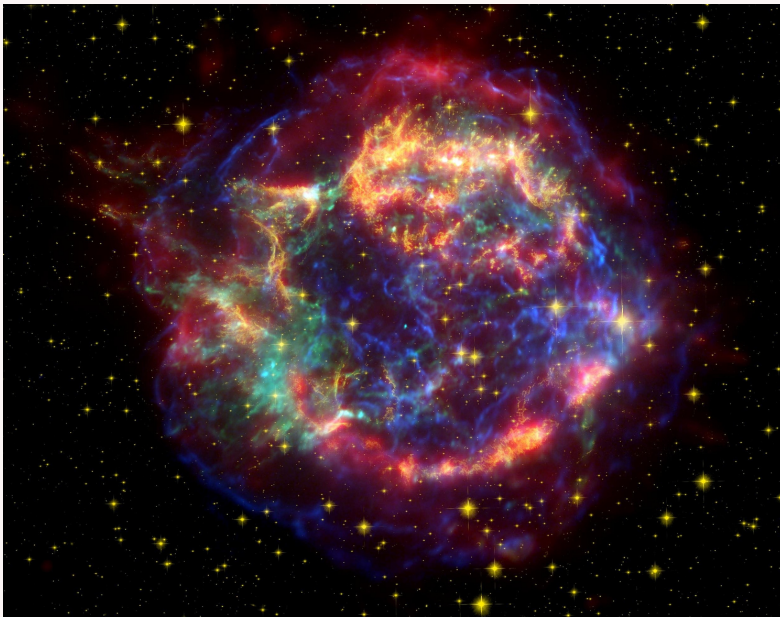


Figura 4: Simulação de supernova

Estrelas do tamanho do Sol conseguem compensar, por bilhões de anos, a contração da matéria ao redor sem colapsar totalmente aumentando a sua temperatura pela fusão de hidrogênio em hélio no seu núcleo e emitindo luz e calor dessa reação. Estrelas maiores precisam atingir temperaturas maiores para evitar o colapso, contudo, esse aumento de temperatura acaba gastando o hidrogênio mais rápido, fazendo com que elas durem bem menos tempo do que as estrelas menores. Quando não há mais hidrogênio, a estrela ainda tenta se manter ativa fundindo o hélio em elementos mais pesados como o oxigênio ou carbono, mas estas reações não são suficientes para liberar a energia necessária e a estrela acaba colapsando.

O que ocorre com o núcleo após o colapso é incerto e depende do tamanho da estrela. Os elementos que são expelidos na explosão podem servir de matéria prima para a formação de novas estrelas ou sistemas solares. Estima-se que o Sistema Solar no qual o nosso planeta está incluído tenha começado com uma **nebulosa** formada a partir de supernovas anteriores há aproximadamente 5 bilhões de anos. A hipótese atual foi sugerida pela primeira vez pelo filósofo alemão Immanuel Kant no século 18 e desenvolvida pelo matemático francês Pierre-Simon de Laplace no final do mesmo século.

Teorias mais recentes apontam que o núcleo pode colapsar em uma **estrela de nêutrons** ou em **buraco negro** dependendo da sua massa. Suas regiões mais externas acabam sendo expelidas pelo universo em uma explosão chamada supernova.

A expressão "somos poeira das estrelas" do cientista Carl Sagan se refere aos principais elementos que estão presentes nos seres vivos (CHONPS - Carbono, Hidrogênio, Oxigênio, Nitrogênio, Fósforo e Enxofre) e que são formados nas estrelas.

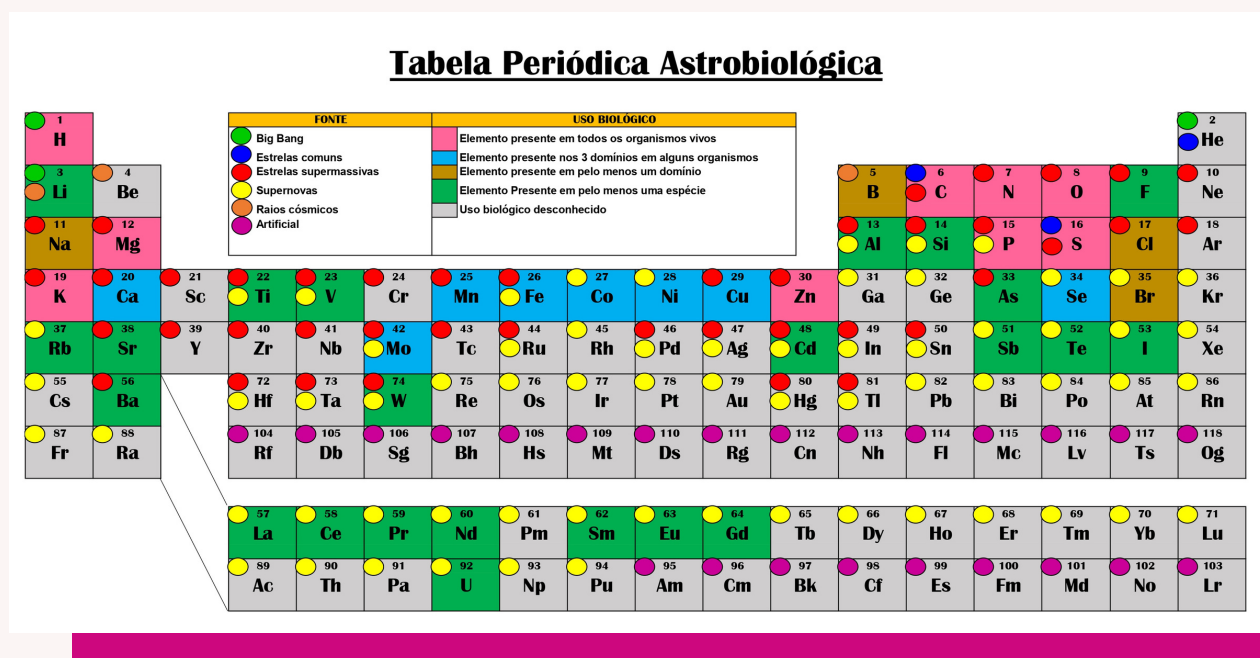


Figura 5: Tabela periódica da origem dos elementos químicos (Adaptado de Charles Cockell @CharlesCockell)

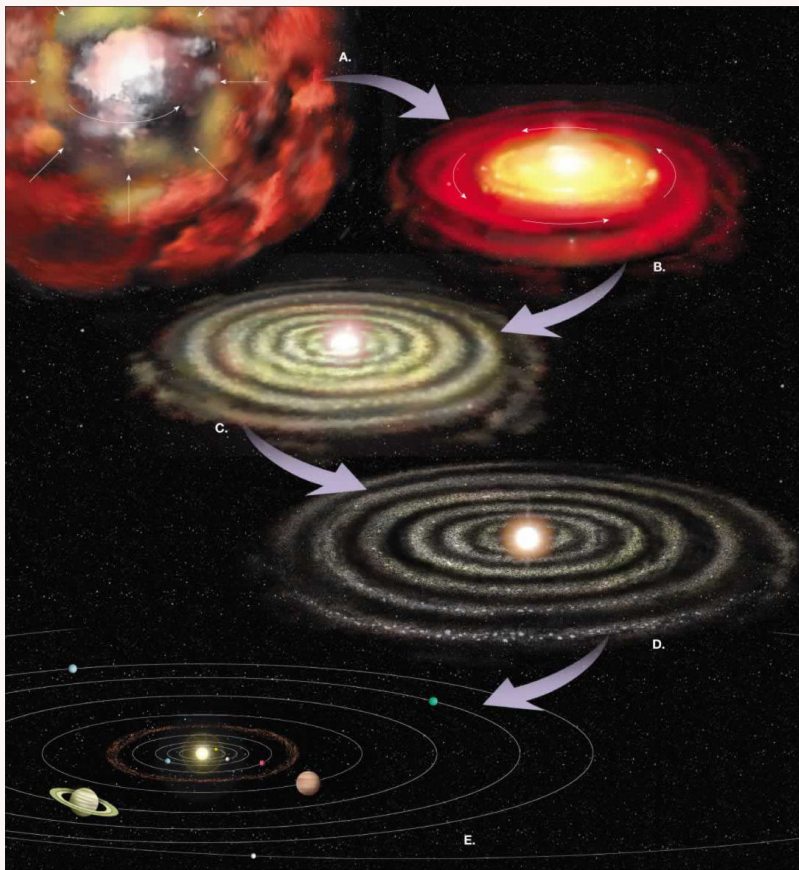


Figura 6: formação do Sistema Solar.

Segundo observações de Laplace, se todos os planetas estão no mesmo plano, giram em torno de sol e em torno de si mesmo na mesma direção (com exceção de vênus que gira em torno de si mesmo na direção oposta), eles só poderiam ter se formado a partir da mesma grande nuvem de partículas em rotação. A forma discoidal com que vemos a posição dos planetas em relação ao Sol é resultado de um fenômeno físico chamado momento angular como visto na imagem ao lado.

A versão moderna dessa teoria viria do físico Alemão Carl Friedrich von Wrižäcker em 1945. Ela contribui no sentido de uma melhor informação sobre como os planetas teriam se formado. Após o colapso primário da nuvem, ela começou a esfriar, e, apenas o que estava no centro (o Sol) manteve sua temperatura. O resfriamento rápido formou os chamados planetesimais, agregados de material cuja composição dependia da distância do Sol.

Regiões mais externas ao disco continham silicatos e gelos, enquanto regiões mais internas possuíam apenas silicatos. Estes núcleos foram crescendo por agregação de material até atingir as massas planetárias atuais. Nas regiões mais externas, o crescimento foi tão grande que puderam atrair o gás remanescente ao seu redor, principalmente o Hidrogênio e Hélio da nebulosa solar, formando os planetas gasosos (Júpiter, Saturno, Urano e Netuno). Nas regiões mais internas os materiais voláteis não estavam em grande quantidade e os silicatos cresceram até dar origem aos planetas rochosos (Mercúrio, Vênus, Terra e Marte). A atmosfera do nosso planeta pôde ser formada através de gases que eram liberados pelas erupções vulcânicas e, posteriormente, pelo aumento do oxigênio liberado através da fotossíntese das algas.

A matéria que não formou nem o sol nem os 8 planetas principais ficou pelo Sistema Solar no formato de planetas anões (como plutão), cometas, asteroides e meteoroides. Muitas vezes estes corpos menores acabam atingindo planetas por conta de suas órbitas coincidentes. Ao atingir o solo, este material é chamado de meteorito.



Figura 7: Galaxia espiral.

METEORITOS

e suas classificações

Meteoritos são fragmentos de corpos sólidos que restaram após a formação do Sistema Solar. Estes corpos, após orbitarem o Sol por bilhões de anos, podem colidir com algum planeta e cair em sua superfície. Quando ainda estão no espaço, são chamados de meteoroides, mas eles podem ter feito parte de corpos maiores como asteroides, cometas, luas e até planetas. Inclusive há vários meteoritos lunares e marcianos encontrados na Terra. O processo de entrar na atmosfera de um planeta faz com que eles emitam uma luz comumente chamada de "meteoro" ou "estrela cadente". A entrada normalmente destrói completamente os fragmentos menores, mas aqueles com tamanho maior sobrevivem à queda e podem ser encontrados ao acaso ou, por cálculos de localização se a queda foi avistada por várias pessoas.

Como eles são o único contato direto que temos com o material que formou o Sistema Solar, estudar os meteoritos é estudar a história da formação dele, pois nos fornece as características diretas sobre como era a composição da nebulosa solar que colapsou há 5 bilhões de anos atrás. A composição de um meteorito pode variar de acordo com o corpo no qual ele fez parte e com as experiências que ele sofreu ao longo da sua história de formação, mas, no geral, eles são compostos por rocha e metal.

Podemos separar os meteoritos em dois grandes grupos: os diferenciados e os não diferenciados. Essa classificação é feita de acordo com a concentração entre ferro/silicatos e a sua origem. Os meteoritos não diferenciados são todos condritos, feitos basicamente por rocha composta por diferentes silicatos e recebem esse nome por não terem sofrido grandes

modificações ao longo da sua existência. Já os meteoritos diferenciados sofreram modificações ao longo tempo com as colisões e a recristalização no interior de corpos maiores (planetários, lunares ou asteroidais) e são divididos em mais 3 principais grupos: os acondritos, os ferrosos e os ferro-rochosos.

Estima-se que anualmente caiam cerca de 40 toneladas de meteoritos por ano, mas poucos deles sobrevivem à queda. Dos que sobrevivem, a grande maioria cai em oceanos ou zonas desabitadas, de forma que poucas dezenas são recuperados por ano. Apesar de eles popularmente estarem associados com destruição e extinções em massa, até hoje só houve um único caso confirmado de um meteorito que atingiu diretamente uma pessoa e poucos que atingiram animais e carros.

CONDritos

Condritos são meteoritos rochosos que possuem composição solar (exceto os elementos voláteis) indicando qual seria a composição da nebulosa original. São fragmentos de corpos maiores como asteroides ou cometas e não sofreram diferenciação magmática. Esse tipo de meteorito recebe esse nome, justamente por apresentar estruturas chamadas côndrulos, que são, geralmente, pequenas esferas (fig. 8). Contudo, há alguns tipos de condritos que não apresentam côndrulos e outros cujos côndrulos são tão pequenos que não é possível identificá-los.

São os objetos mais antigos que conhecemos, com aproximadamente a mesma idade e composição do Sistema Solar, indicando qual seria a composição da nebulosa original. Eles também são divididos em subgrupos de acordo com a quantidade de metal e silicatos presente na sua composição.

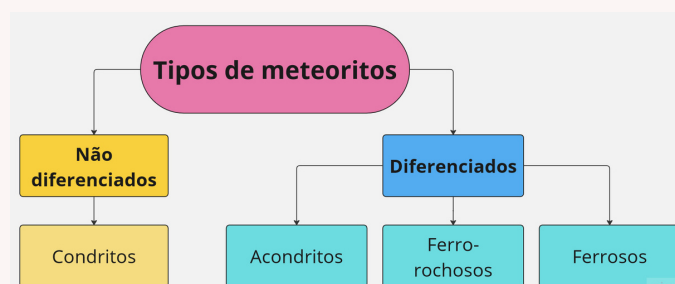


Figura 8: Classificação resumida dos meteoritos.

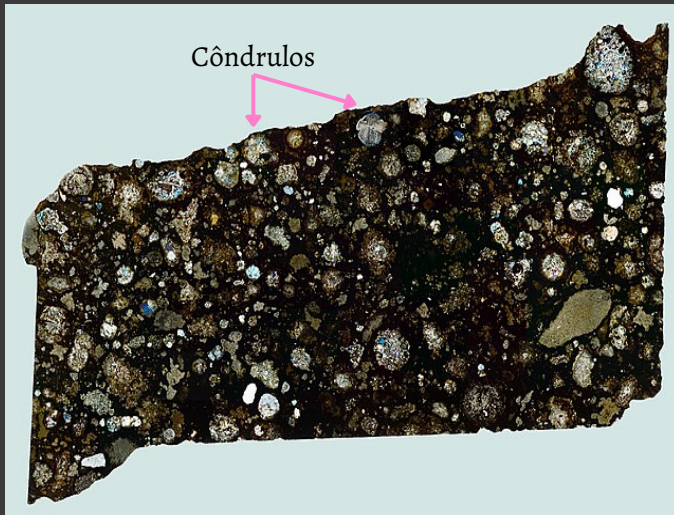


Figura 9: Meteorito condrito NWA 2224

De todos os grupos, os condritos ordinários são os mais comuns e abundantes, correspondendo cerca de 85% das quedas. Eles possuem bastante metal em sua composição, variando entre 19% a 30% do seu peso, o que os fazem ser facilmente atraídos por ímãs.

Outro grupo que merece destaque são os condritos carbonáceos, que contém pouco ou nenhum ferro na sua composição e são extremamente raros (cerca de 4% das quedas). Contudo, são extremamente importantes no estudo da evolução planetária e origem da vida na Terra por estarem associados à chegada de compostos orgânicos complexos. São considerados os condritos mais primitivos, se aproximando muito da composição solar, mas também possuem grandes quantidades dos compostos orgânicos em formato de **hidrocarbonetos**, uma das moléculas indispensáveis para a vida, além de outros tipos de moléculas. Outra especulação é que eles teriam trazido uma parte da água presente na Terra através de constantes bombardeamentos no início da formação do planeta.



Figura 10: Meteorito carbonáceo NWA 10574 da coleção do Observatório Astronômico da UFSCar



Figura 12: Meteorito Santa Filomena (ordinário) da coleção do observatório da UFSCar.

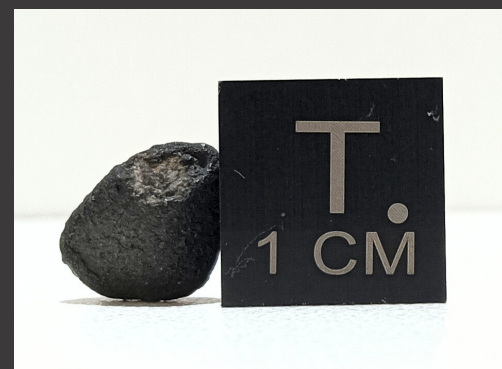


Figura 13: Pedaco do meteorito ordinário que caiu em Chelyabinsk em 2013 (coleção da UFSCar)

Curiosidade: O meteorito de Porangaba foi o primeiro meteorito brasileiro a ter a sua trajetória e órbita calculadas.

ACONDritos

Teoricamente, são meteoritos rochosos que não possuem côndrulos. Contudo, uma melhor definição seria fragmentos de corpos primordiais, originalmente condriticos, que sofreram algum grau de modificação ao longo da sua existência. Dessa forma, os meteoritos ferrosos e ferro-rochosos são meteoritos diferenciados, mas não acondritos. Há uma classe de acondritos que não sofreram diferenciação completa e são chamados de acondritos primitivos. Contudo, os principais representantes dessa classe são os que sofreram diferenciação completa.

A diferenciação ao qual está sendo referida é o processo que os corpos celestes passam ao longo da sua existência ao separar a sua composição homogênea em várias fases com diferentes composições químicas. Um corpo totalmente diferenciado é composto por um núcleo de ferro, um manto de silicatos, uma crosta basáltica e, nos casos em que são grandes o suficiente, uma atmosfera gasosa.

Os acondritos podem ser originários de diferentes corpos do Sistema Solar como as rochas do cinturão de asteroides, Lua e outros planetas como Marte. Contudo, essas quedas são mais raras, cerca de 7%. Quanto à composição dos acondritos, eles se parecem muito com as rochas terrestres, sendo divididos também quanto à porcentagem de cálcio ou origem do corpo parental (crosta ou manto).

Os meteoritos lunares são meteoritos que possuem muitas semelhanças com as rochas terrestres, o que reforça a hipótese de que a lua um dia já foi parte da Terra e o material que a formou foi ejetado devido à uma colisão com um planetóide um pouco menor que a Terra no início da sua formação. Os meteoritos lunares contêm certos **isótopos** que só podem ser produzidos por reação com **raios cósmicos** fora da nossa atmosfera e possivelmente foram separados da lua por impactos de asteroides e recapturados pelo campo gravitacional do planeta.

Em agosto de 1996 foi anunciada a descoberta de supostos sinais de vida microbiana no meteorito marciano ALH 84001. Essa possibilidade foi concebida após a evidência de água, hidrocarbonetos, produtos metabólicos de bactérias e estranhas formas alongadas na rocha que lembram fósseis de bactérias serem encontradas no meteorito. Contudo, nenhuma dessas observações puderam afirmar conclusivamente que existiu vida primitiva em Marte ou que pode haver vida existindo em outros corpos celestes.

Figura 16: Meteorito lunar da coleção do Observatório Astronômico da UFSCar

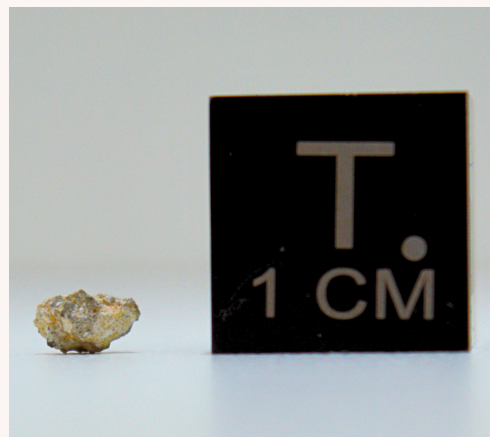


Figura 14: Supostos fósseis no meteorito marciano ALH 84001.

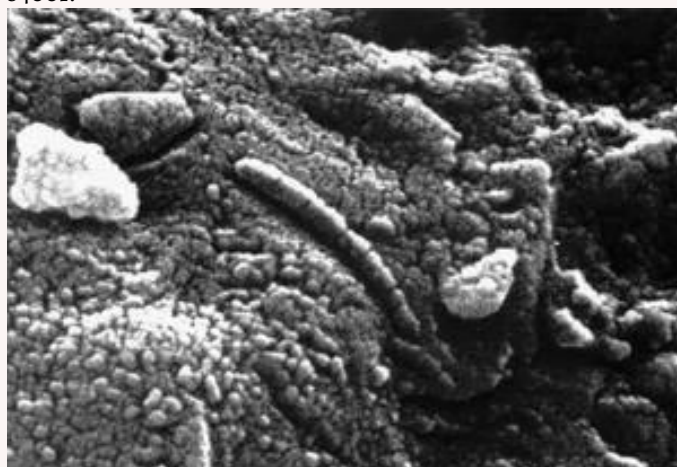


Figura 15: Meteorito marciano ALH 84001.

FERRO-ROCHOSOS

Também conhecidos como Siderolitos, os meteoritos ferro-rochosos possuem esse nome por terem, em sua composição, tanto rocha (principalmente silicatos) quanto metal. São bastante diferenciados dos outros grupos de meteoritos por possuírem as fases metálicas e rochosas bastante distinguíveis entre si. As quantidades de silicatos e ferro podem variar dependendo da origem de formação no corpo parental, mas normalmente estão em uma constituição de 50:50 e são classificados em 2 grupos distintos: os Pallasitos e os Mesosideritos. Os Pallasitos são formados entre o núcleo metálico e o manto inferior de corpos asteroidais diferenciados e os mesosideritos por fusão durante um impacto e constituídos por uma mistura de diversos corpos parentais.



Figura 17: Meteorito ferro-rochoso

FERROSOS

Os meteoritos ferrosos, ou Sideritos, são constituídos basicamente por metal, sendo os principais o ferro e o níquel. São, em sua maioria, provenientes dos núcleos planetários. Devido às altas quantidades de metal, são facilmente distinguíveis das rochas terrestres, além de serem fortemente atraídos por ímãs. Outro fato é que eles resistem mais à passagem pela atmosfera terrestre, o que os torna, em geral, os maiores meteoritos encontrados. Os meteoritos metálicos também resistem mais ao intemperismo, permitindo que eles sejam preservados por bastante tempo, mas também sofrem com a oxidação e formação de ferrugem em locais úmidos. Acredita-se que a maioria das grandes crateras tenham sido formadas por meteoritos ferrosos. São classificados quanto à estrutura e composição química.

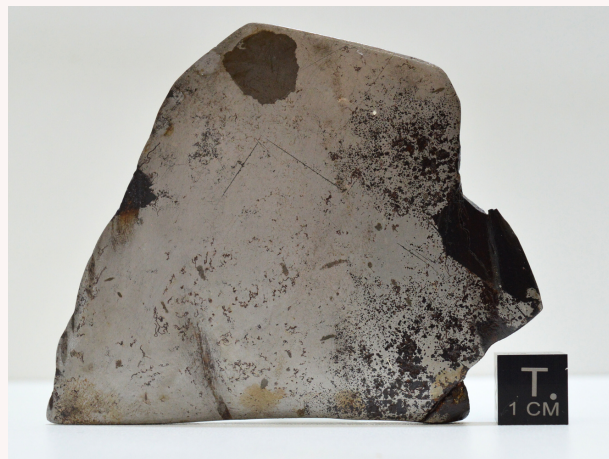


Figura 18: Meteorito Santo Antônio do Descoberto (coleção do Observatório Astronômico da UFSCar).

Conheça a coleção de meteoritos da UFSCar por completo:

Escaneie o QR code ao lado com a câmera de seu celular e faça um tour pela coleção de meteoritos do Observatório Astronômico da UFSCar.



ASTROBIOLOGIA

E o início da vida

Como descrito no capítulo anterior, uma análise do meteorito marciano ALH 84001 lançou novamente uma luz sobre a existência de vida primitiva vivendo fora da Terra. Mas, até agora, houve realmente constatação de vida fora do planeta em que vivemos? A resposta é um tanto quanto desanimadora: não. Contudo, nos últimos anos, a ciência da astrobiologia se desenvolveu muito em face da tecnologia. Foi possível coletar algumas pistas sobre como organismos podem viver em ambientes extremos e modificá-los. Atualmente, os trabalhos estão se voltando para a busca do que os astrobiólogos chamam de "bioassinatura", uma espécie de "traço" que seria deixado por seres vivos que habitam ou habitaram outros mundos. Quem sabe nos próximos anos não conseguimos uma prova definitiva através dos programas espaciais recentes, como o telescópio espacial James Webb.

Mas, para que possamos entender e pesquisar uma possível vida extraterrestre, precisamos primeiro entender como foi possível a vida surgir e existir aqui. Dessa forma, a astrobiologia também trabalha com a questão da origem da vida no nosso planeta Terra. No capítulo 1 foi descrita a origem do Sistema Solar, assim, agora é possível descrever o que a ciência moderna acredita sobre a origem dos seres vivos.

Por muito tempo as pessoas acreditaram que a vida poderia surgir espontaneamente de objetos inanimados, hoje sabemos que não é dessa forma, mas, se levarmos este raciocínio para o nível químico, precisamos de uma explicação robusta para o surgimento da complexidade da maquinaria celular através de moléculas simples. Vale lembrar que também foi descrito aqui a importância dos estudos com meteoritos carbonáceos para responder esta pergunta.

A grande pergunta da astrobiologia é a seguinte: sendo a física e a química comuns em todo o universo, será também a biologia? (GALANTE et al., 2016). Mas a pergunta não é fácil de responder. Ela envolve questões muito antigas sobre as quais a humanidade se debruça há milênios como "O que é a vida?" "Como tudo começou?" "Para onde vamos?" e "O que fazer se acharmos vida fora da Terra?".

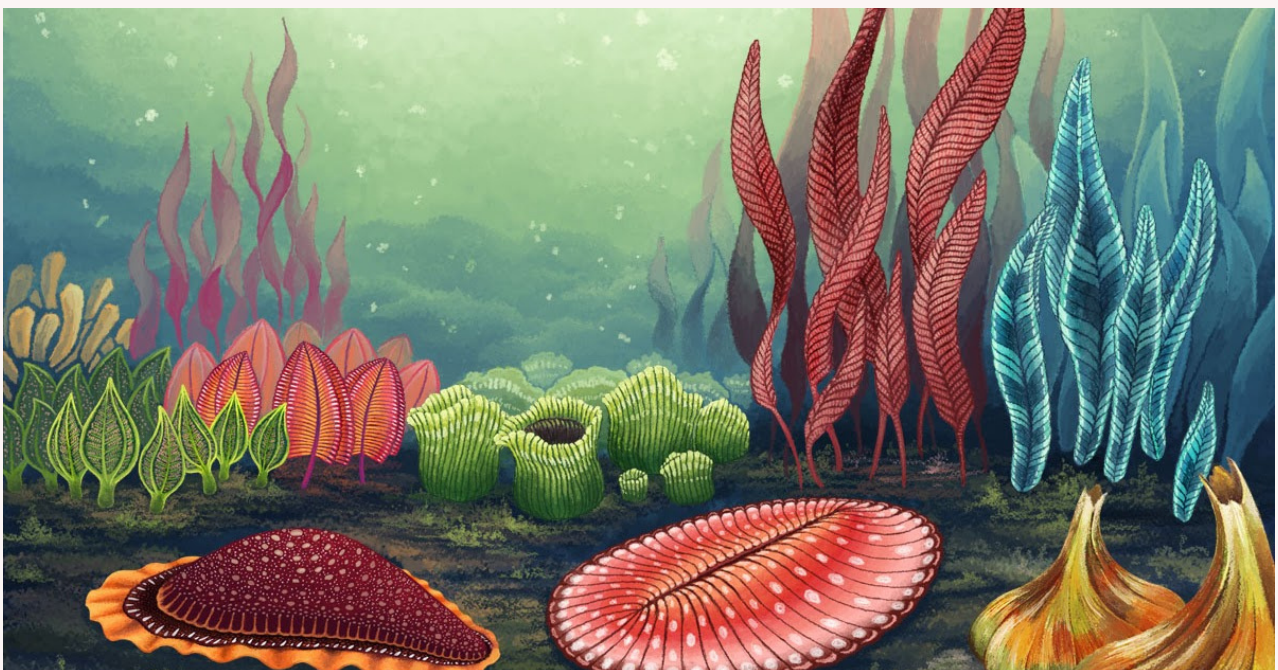


Figura 19: Fauna ediacarana.

Em 1828, Friedrich Wöhler foi capaz de produzir uma substância orgânica (a ureia) a partir de algumas reações químicas em seu laboratório. Em 1871 Charles Darwin descreve conceitualmente a possibilidade de a vida ser gerada a partir de uma fonte de água quente contendo sais de amônia, sais fosfóricos, luz, calor e eletricidade. Mendeleev, em 1877, demonstrou a origem dos lipídeos a partir de hidrocarbonetos gerados experimentalmente, o que levou Aleksandr Ivanovich Oparin a publicar seus trabalhos sobre a origem da vida no início do séc XX. Em 1923 Oparin propôs que o início da vida pudesse ter acontecido através da forma abiótica pela formação dos aglomerados proteicos chamados coacervados. Estes protótipos celulares se reproduziam por fissão e teriam algum tipo de metabolismo simples. Alguns anos depois, em 1929, John Burdon Sanderson Haldane publicou uma teoria semelhante a Oparin. A publicação desses trabalhos levou Stanley Lloyd Miller e Harold Clayton Urey a realizarem o famoso experimento simulando uma Terra primitiva na década de 50. Como resultado, eles obtiveram aminoácidos de forma totalmente abiótica.

Apesar de todos estes experimentos, ainda assim precisamos de um entendimento maior sobre como essas estruturas se organizaram em níveis tão complexos ao ponto de formar seres pluricelulares que encontramos hoje em dia. Aqui vale uma possível definição do que é a vida. Apesar de não ter uma resposta simples para esta pergunta, a maior parte dos cientistas concordam que, para que algo seja considerado como vivo, é preciso que ele apresente basicamente 3 características:

Características da vida:

- 1. Compartimentalização:** todo organismo vivo possui uma maneira de se separar do meio que o circunda. As células usam membranas lipídicas; os vírus, capsídeos proteicos. Essa membrana tem diversos papéis, mas o mais básico de todos é o de concentrar, em seu interior, as moléculas necessárias para seu funcionamento;
- 2. Informação:** o organismo vivo deve possuir, em si, toda a informação necessária para sua manutenção e continuidade, portanto, para se perpetuar e reproduzir;
- 3. Metabolismo:** o organismo vivo deve ser capaz de realizar as reações químicas necessárias para garantir sua sobrevivência e reprodução. Essa característica não está completamente presente nos vírus, que usam outros organismos como hospedeiros para realizar essas funções (motivo da controvérsia se vírus estão ou não vivos), o que indica que vírus e células provavelmente coevoluíram durante a história da Terra.

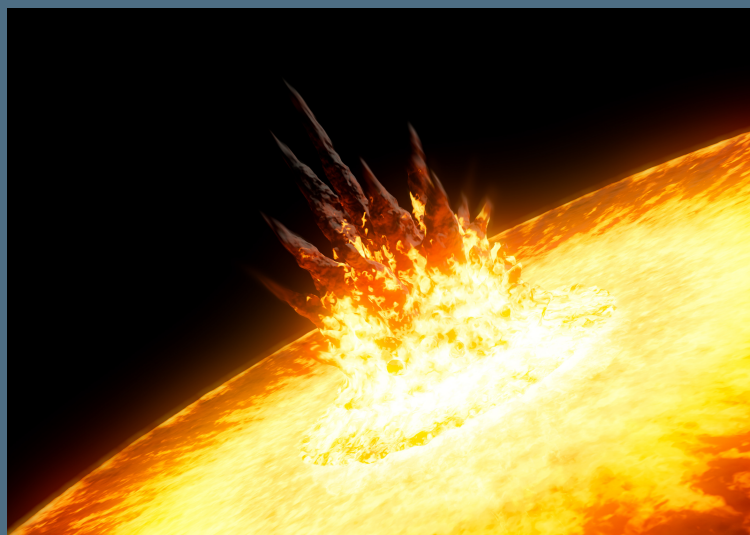


Figura 20: Simulação do planeta Terra nos seus primeiros milhões de anos

Figura 21: Aleksandr Oparin.



Figura 22: J. B. S. Haldane

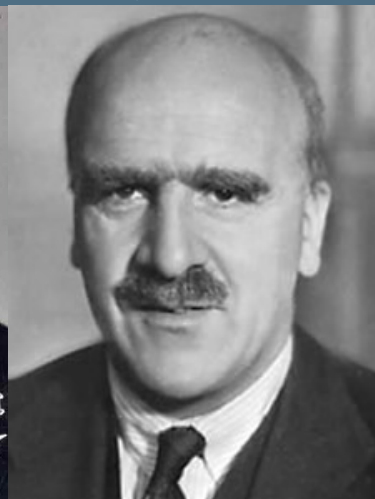




Figura 23: Estromatólitos atuais da Austrália.



Figura 24: Estromatólitos fósseis de Great Slave Lake, Canada

Não é possível saber, ainda, se ao longo da evolução houve algum outro tipo de mecanismo tão capaz de armazenar informações, se autorreplicar e possuir um metabolismo próprio quanto ao que conhecemos hoje: o DNA e o RNA. Talvez esse outro mecanismo tenha sido extinto através de competição ou algum outro fator. Sabemos que a vida se originou não muito tempo depois que a Terra se formou (cerca de 3,5 bilhões de anos atrás) através dos chamados estromatólitos. Os estromatólitos são fósseis químicos descobertos através de uma formação rochosa existente na Austrália. Os estromatólitos modernos, também presentes na Austrália, são formados por um biofilme de cianobactérias. Contudo, acredita-se que os fósseis encontrados nas rochas datadas de 3,45 bilhões de anos tenham sido formados por organismos já extintos que ocupavam o mesmo nicho ecológico que os estromatólitos modernos. Uma coisa é fato: Desde o seu surgimento aqui, a vida nunca parou de evoluir. Na biologia evolutiva a evolução é definida como "descendência com modificação", principalmente no que diz às mudanças no material genético.

Mas é válido ressaltar que a evolução é muito mais do que pura genética. Atualmente as teorias evolutivas modernas tendem a dar um maior enfoque na interação entre os genomas e o ambiente. Uma contribuição importante na ideia de que a vida seria uma grande colaboração entre os seres vivos foi a teoria da endossimbiose, desenvolvida pela bióloga Lynn Margulis na segunda metade do século passado.

Entender esta relação entre os seres vivos e o planeta em que habitam também é uma chave importante na astrobiologia. Para além de entender como a vida começou, entender as "bioassinaturas" e como elas podem surgir em outros planetas, esta questão também nos leva a procurar maneiras de compreender o nosso próprio efeito na dinâmica do nosso planeta. Para que possamos alcançar a diminuição do impacto das sociedades humanas nos ciclos biogeoquímicos naturais e prevenir possíveis catástrofes.

Por exemplo, uma das principais mudanças acarretadas por seres vivos foi a "poluição" de oxigênio na atmosfera. Acredita-se que os primeiros organismos vivos, como os estromatólitos, existiram em uma atmosfera completamente diferente da atual e em uma quantidade de oxigênio próxima do 0,01%. Em um ambiente com essas características é provável que eles possuíam um metabolismo parecido com as bactérias anaeróbias ou com os microrganismos que atualmente vivem em ambientes extremos, como lagoas extremamente salgadas, gêiseres de água fervente, caldeiras vulcânicas, desertos ou geleiras. Com o surgimento da fotossíntese, a atmosfera se transformou completamente, elevando os níveis

de oxigênio, que é tóxico para a maioria dos organismos anaeróbios. Posteriormente, essa nova condição levaria à formação da camada de ozônio que protege os organismos das radiações fortes vindas do Sol.

Acredita-se que 90% dos organismos que não eram fotossintetizantes foram extintos nesta época, caracterizando o que pode ser considerado a "primeira extinção em massa" (mas para a paleontologia, primeira grande extinção de seres pluricelulares aconteceu no final do período Cambriano, que deu início ao Ordoviciano). A evidência do fenômeno da fotossíntese pode ser vista em formações geológicas que indicam a oxidação massiva dos minerais da crosta terrestre da época. A partir deste evento, o nível de oxigênio sofreu variações ao longo do tempo, o que está ligado a alguns eventos geológicos importantes. Mas a mudança mais importante foi a possibilidade de formação da camada de ozônio, o principal escudo para os seres vivos contra radiações extremamente fortes do sol.

O principal objetivo da fotossíntese é produzir compostos orgânicos através da energia solar, principalmente a glicose, para o próprio consumo dos organismos fotossintetizantes.

O oxigênio era um mero subproduto da reação, contudo, com o acúmulo desse elemento na atmosfera, outro tipo de metabolismo pode existir: a respiração aeróbia. Consumindo o oxigênio que era liberado pela fotossíntese, a respiração aeróbia revolucionou a forma de obtenção de energia.

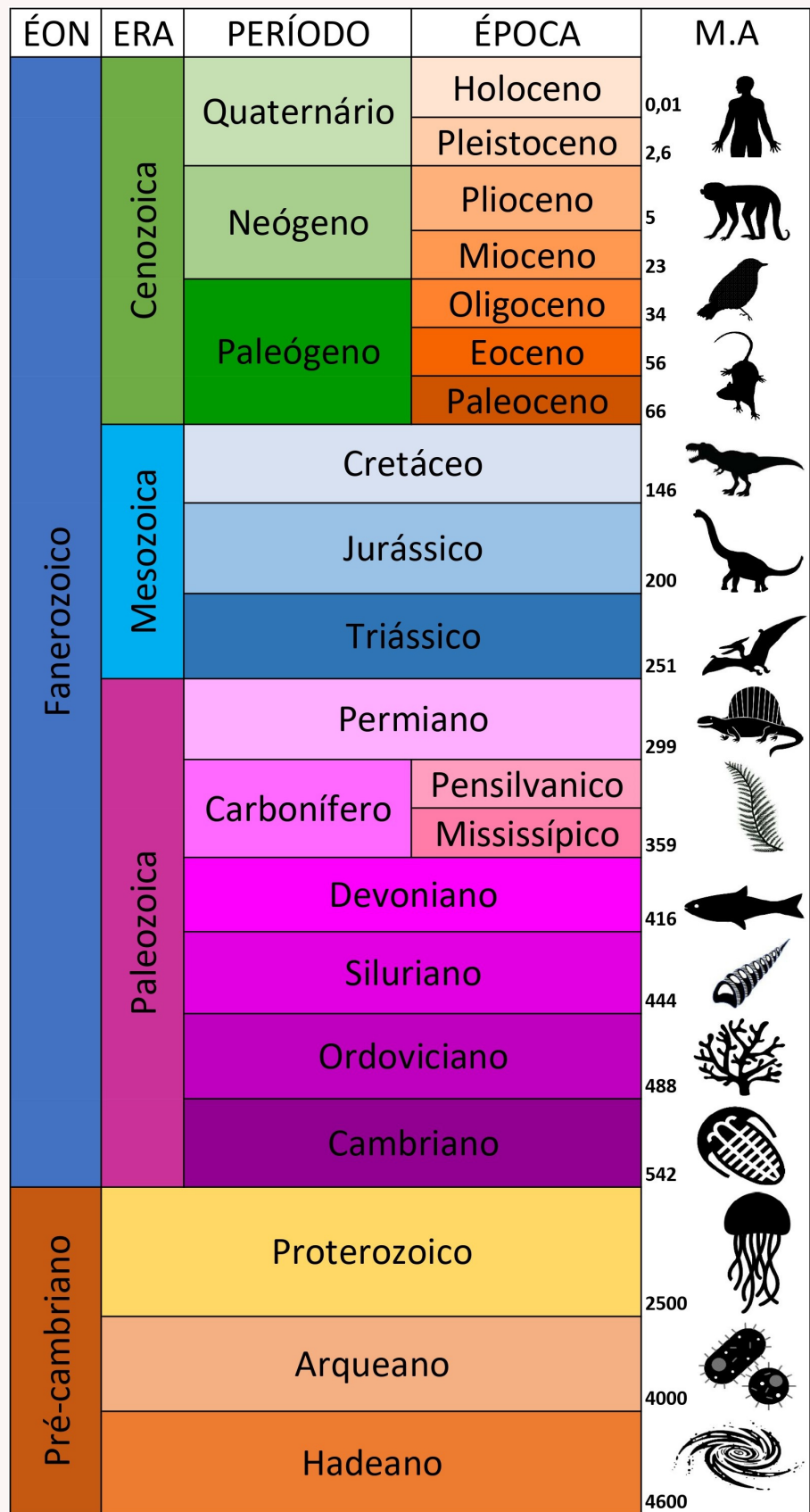


Figura 25: Principais eventos geológicos.

Com dois competidores tão potentes, a forma de respiração anterior, aeróbia, que era muito menos eficiente, acabou perdendo espaço na evolução, mas continuou a colonizar algumas partes do planeta, possibilitando o estudo de como era a atmosfera primitiva.

O processo evolutivo que se seguiu continuou a acompanhar e modificar os eventos geológicos que surgiram subseqüentemente. Assim, não é possível separar, na ciência evolutiva, as relações entre os seres vivos e o meio em que vivem. Outra justificativa para se entender como nós, como seres humanos, estamos impactando nosso planeta. Estudos sugerem que através da ação humana estamos entrando em uma 6ª extinção em massa devido ao aquecimento global, evidenciados por constatações dentro do campo da paleontologia, que mostram que após a dispersão homínida espécies voltaram a ser extintas em uma velocidade maior do que as épocas anteriores.

Acredita-se também que, com o evento da fotossíntese, a camada de ozônio e a respiração aeróbica, o ambiente de competição livre favoreceu o surgimento de uma grande diversidade de vida, possibilitando o aparecimento de seres endossimbiontes e multicelulares como

plantas e animais. A explosão cambriana é conhecida como o principal evento de colonização desses seres no planeta. A teoria da endossimbiose explica como os organismos foram capazes de sobreviver a um ambiente rico em oxigênio através da associação entre organismos unicelulares e bactérias capazes de fazer respiração aeróbica. Muito tempo depois, a bactéria teria evoluído ao que hoje conhecemos como mitocôndria. É também através da endossimbiose que se explica a capacidade das plantas terrestres fazerem fotossíntese. Os cloroplastos seriam cianobactérias primitivas que foram associadas por outro organismo dando origem à célula vegetal. Uma grande evidência desse processo é a presença de DNA mitocondrial e cloroplástico presentes respectivamente nas mitocôndrias e nos cloroplastos até hoje, indicando que eles teriam sido organismos independentes há muito tempo atrás.

Meteoritos e as extinções em massa:

Acredita-se que pelo menos uma das 5 grandes extinções em massa que ocorreu durante a história da vida na Terra tenha sido causada pela queda de um grande meteorito. A mais conhecida é aquela que pode ter sido a causa derradeira do desaparecimento dos grandes dinossauros (hoje sabemos que nem todos os dinossauros foram extintos, as aves são derivadas de um grupo especializado de dinossauros, os terópodes). Essa queda teria acontecido há 65 milhões de anos e as mudanças climáticas que se seguiram por consequência levariam ao fim do período cretáceo e dos grandes carnívoros que existiam. Os motivos que levam os cientistas a acreditar neste ocorrido é a presença de uma quantidade anômala de irídio em camadas geológicas que marcam o fim do cretáceo, o que permitiu sugerir um impacto de um asteroide com cerca de 10 Km de diâmetro. Os vestígios desse evento seria a cratera de Chicxulub, localizada na península de Yucatan no México.

Obviamente outros fatores contribuíram para o desaparecimento destes animais gigantes, mas o evento da queda de um meteorito foi considerado a "gota d'água" para os dinossauros, que já estavam vivendo tempos difíceis.



COMO ESTUDAR OS METEORITOS

De acordo com todas as descrições anteriores, já deu para notar que estas rochas não são tão triviais assim. Mas diferenciar uma comum de um meteorito não é uma tarefa tão fácil, na verdade, é bem mais difícil do que parece. Mais que boa vontade e olhos atentos, é preciso algumas técnicas para saber distinguir um basalto comum de um pedaço do Sistema Solar que caiu aqui por acaso. Apesar disso, algumas dicas podem ajudar um entusiasta iniciante a diferenciar ligeiramente se aquilo que recolheu em um passeio na trilha é uma brita qualquer ou pode ser um meteorito.

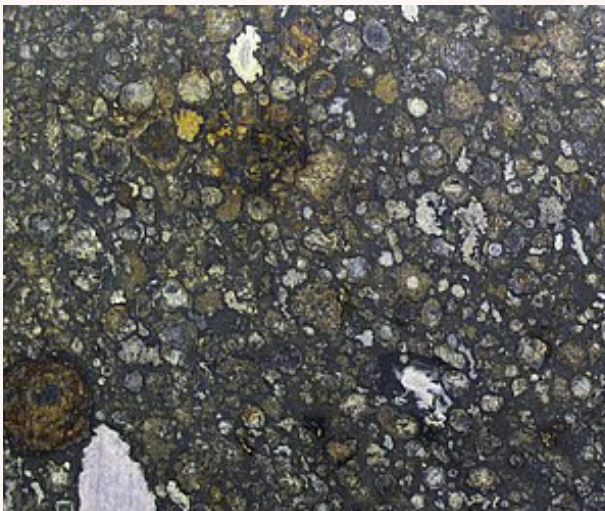


Figura 27: Exemplo de côndrulos

Côndrulos são pequenas bolinhas formadas pela condensação da poeira cósmica que formou o Sistema Solar. Apesar deles aparecerem somente nos condritos, esse tipo de meteorito é mais comum de ser achado (cerca de 85% das quedas), portanto, esta é uma característica importante a se reparar.

Além da crosta de fusão, os meteoritos podem apresentar certas marcas parecidas com apertões de dedo em massinha de modelar chamados regmaglitos. Estas marcas são formadas pela ablação na entrada da atmosfera e principalmente nos meteoritos Sideritos por serem mais resistentes à passagem.



Figura 26: Crosta de fusão do Meteorito Porangaba (UFSCar).

A primeira característica que se deve observar na rocha é se ela tem uma superfície escura em seu entorno. Isso fica óbvio quando pensamos que os meteoritos queimam durante a entrada na atmosfera, contudo, se ele se partiu assim que colidiu com o solo, algumas partes podem não apresentar a chamada crosta de fusão, o que é bem fácil acontecer. A crosta também pode ser brilhante ou fosca dependendo da composição do meteorito, sendo que meteoritos rochosos normalmente apresentam uma crosta fosca e acondritos uma crosta mais vítrea. Assim, se ele apresentar partes que não são queimadas, pode-se prestar atenção à uma segunda característica: a presença de côndrulos.



Figura 28: Exemplo de regmaglitos

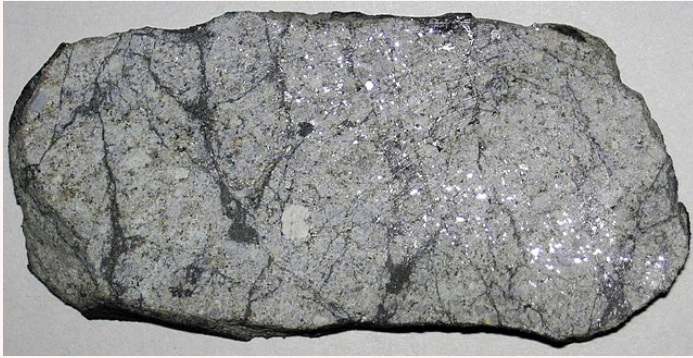


Figura 29: Exemplo de presença metálica

AVISO: OS TESTES DEMONSTRADOS AQUI SÃO O PRIMEIRO PASSO NO RECONHECIMENTO DE UM METEORITO MAS NÃO SÃO DEFINITIVOS. PROCURE UM LABORATÓRIO ESPECIALIZADO ANTES DE COLOCAR O MATERIAL À VENDA.

Uma quarta característica importante é a atração magnética. Como somente os meteoritos acondritos (que são formados somente pela parte rochosa) não são atraídos por ímãs, a atração magnética também é um grande sinal de que se está diante de uma rocha espacial. Esta atração pode ser mais fraca dependendo da porcentagem de ferro que ele apresenta, sendo os ferrosos os que mais atraem. Por terem bastante metal em sua composição, uma característica adicional será o peso dos meteoritos, pois eles geralmente apresentam um peso maior quando comparados com uma rocha comum por ação da composição metálica.

Outras características que podem servir de guia são o tamanho, normalmente não são muito grandes (são raros os que passam dos 100kg), e a densidade (pela composição metálica mas também pela formação no espaço).

Como classificar os meteoritos:

As técnicas que pesquisadores usam para classificar os meteoritos podem ser separadas em dois tipos: as análises químicas e as análises macro e microscópicas.

Se você acha que achou um possível meteorito, pode enviar amostras ao laboratório mais perto de você. Alguns pesquisadores e instituições que estudam e classificam meteoritos são:

- Prof.^a Maria Elizabeth Zucolotto, Setor de Meteorítica do Museu Nacional da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro - RJ.
- Prof. Gaston Rojas, Instituto de Geociências e Museu de Geociências da Universidade de São Paulo (IGc/USP), São Paulo - SP.
- Prof. Álvaro Crosta, Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas (IG/UNICAMP), Campinas - SP.
- Prof.^a Débora Rios, Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia (Igeo/UFBA), Salvador - BA.

(Atenção: os contatos estão sujeitos a mudanças, entre em contato com a entidade de pesquisa e confira os dados antes de enviar)



Descrição macro e microscópica:

Meteoritos Rochosos (condritos e acondritos)	Meteoritos Ferrosos	Meteoritos Ferro-rochosos
Petrografia: descrição das estruturas minerais em lâmina petrográfica [1] como côneulos, matriz, flocos metálicos e demais opacos (tipo petrográfico) [2]; quantidade de oxidação (grau de intemperismo) [3]; e feições de choque e presença de derretimento ou melt (grau de choque) [4].	Metalografia: descrição de fatia polida e tratada com nítol. Medida das bandas de kamacita e taenita, descrição da presença de outras estruturas ou minerais como plessita, troilita, schreibersita, carbeto e etc [6].	Petrografia da parte rochosa (vide Meteoritos Rochosos) e metalografia da parte metálica (vide Meteoritos Ferrosos).

Análises químicas:

Meteoritos Rochosos (condritos e acondritos)	Meteoritos Ferrosos	Meteoritos Ferro-rochosos
Microsonda para analisar a química mineral, principalmente determinar as composições médias das olivinas, piroxênios e plagioclásios [5].	Análise química (INAA, ICP-MS ou LA-ICP-MS) da fase metálica, determinando a concentração de elementos majoritários (Ni e Co), e vários minoritários (como Cr, Ir, Ga, Ge, As, Pt, Cu, W, Pd, Ag, Au, Pd e Os) [6,7].	Microsonda para a parte rochosa (vide Meteoritos Rochosos) e análise química para a parte metálica (vide Meteoritos Ferrosos).

[1] GRADY, M.; PRATESI, G.; MOGGI CECCHI, V. Atlas of meteorites. Atlas of Meteorites, 2014.

[2] <https://www.lpi.usra.edu/books/MESSII/g007.pdf>

[3] STÖFFLER, D.; KEIL, K.; SCOTT, E. R. D. Shock classification of ordinary chondrites: new data and interpretations. Meteoritics, v. 27, p. 292-293, 1992.

[4] <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1993Metic..28Q.460W/abstract>

[5] KROT, A. N. et al. Classification of meteorites and their genetic relationships. Meteorites and cosmochemical processes, v. 1, p. 1-63, 2014.

[6] <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016703789900161>

[7] <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2014/ja/c3ja50387a/unauth>

EXPERIMENTOS

Para fazer em aula ou em casa

1. CHUVA DE METEORITOS

Toneladas de material cósmico caem na terra anualmente, mas nem todos sobrevivem à entrada pela atmosfera e os menores acabam se tornando poeira cósmica. Você pode conseguir coletar uma parte dessa poeira cósmica, que ficou na atmosfera após se separarem do corpo original, direto da sua casa. Assim que ficar sabendo que irá chover após uma chuva de meteoros ou um período longo de seca, coloque um recipiente limpo e grande o suficiente para que caiba na saída de água da calha da sua casa, ou, se preferir, pode colocar uma bacia direto na chuva.

Após a chuva passar, recolha o recipiente e, com cuidado, remova as possíveis sujeiras que estarão na superfície. As partículas mais densas, como os micrometeoritos, ficarão depositadas no fundo. Agora utilize um ímã para que os pequenos sideritos fiquem grudados nele, os melhores ímãs são os mais fortes que achar. Você pode utilizar várias técnicas para recolhê-los do balde, como esperar a água secar e depois passar o ímã no fundo do recipiente, colocar ele direto no balde, entre outras.

Observe as partículas que ficaram presas no ímã, especialmente as que se parecerem uma pequena esfera, provavelmente o que você observar serão os sideritos metálicos, mas eles são tão pequenos que você pode precisar de uma lupa.

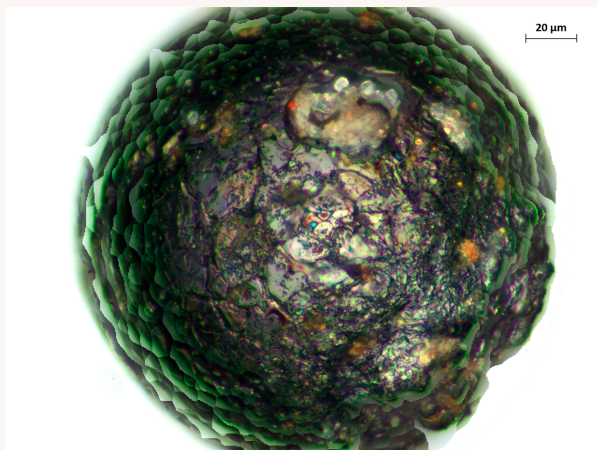


Figura 31: Amostra de micrometeorito

2. ESTRUTURAS INTERNAS

Atenção: Somente adultos devidamente equipados com luvas e material de segurança química.

Caso você queira se aventurar um pouco mais no mundo dos meteoritos, os sideritos (metálicos) podem ser submetidos a um teste simples para revelar as estruturas de Widmanstätten. Primeiramente prepare o meteorito cortando uma pequena área com uma serra de aço para observar o seu interior. Lixe a superfície cortada com lixas de diferentes granulometrias (100 a 400) girando o sentido de lixamento em 90° a cada troca. Assim que obter uma superfície lisa, espalhe um pouco de nital (ácido nítrico + álcool) 5% ou 10% com um algodão ou pincel ultramacio sobre a superfície lixada. O ácido deve ser espalhado uniformemente por toda a superfície, sendo constantemente movimentado até que a estrutura se desenvolva por completo. O momento de interromper o teste é empírico, pois muda de um meteorito para outro.

Em geral deve-se ficar acompanhando o desenvolvimento das estruturas e, quando achar que está bem revelada, coloque o meteorito debaixo de água corrente por alguns minutos.

Os meteoritos metálicos devem exibir as estruturas de Widmanstätten bem proeminentes ou, quando não possuírem a estrutura como no caso dos hexaedritos e ataxitos, esta preparação também confere uma boa apresentação da pedra. Se desenvolverem uma estrutura de lamelas entrelaçadas, seguindo uma orientação octaédrica, são chamados octaedritos; se apenas desenvolverem linhas finas paralelas, são os hexaedritos; e se aparentemente não desenvolverem estrutura alguma a olho nu, são classificados como ataxitos.

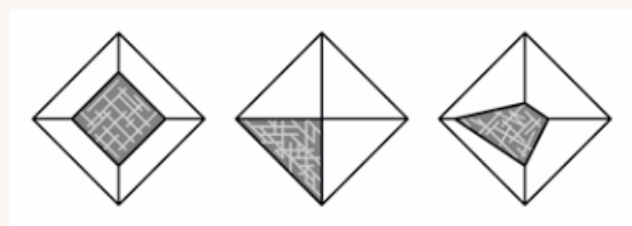


Figura 32: Estruturas de Widmanstätten

GLOSSÁRIO

Anos-luz: Medida astronômica. A distância em que a luz percorre em um ano. O equivalente a 9,46 trilhões de quilômetros no total.

Asteróide: Corpos rochosos de estrutura metálica e formato irregular que orbitam em torno do Sol. Seu diâmetro pode ser de poucos metros a quilômetros;

Brilho aparente: Medida da luminosidade de um objeto astronômico observado da Terra, também chamada de magnitude aparente;

Brilho real: Medida da luminosidade intrínseca de um objeto astronômico, também chamada de magnitude absoluta;

Buraco negro: Região do espaço-tempo em que o campo gravitacional é tão intenso que nenhuma partícula ou radiação eletromagnética, nem mesmo a luz, consegue escapar ao chegar perto;

Cometa: Grandes "bolas de gelo sujas" originados pela junção de vários gases que orbitam em torno do Sol. São formados por um núcleo formado por várias partículas sólidas, cercado por um envoltório gasoso. Ao se aproximar do sol, o material volátil passa do estado sólido para o líquido formando a cabeleira e a cauda do cometa;

Endossimbiose: Relação ecológica que ocorre quando um organismo vivo é incorporado por outro e permanece vivendo em seu interior;

Estrela de nêutrons: Objeto astronômico superdenso, composto quase inteiramente de nêutrons. Surgem da morte de uma estrela massiva;

Fusão nuclear: Processo no qual dois ou mais núcleos atômicos se juntam e formam outro de maior número atômico;

Galáxias espirais: Tipo de galáxia que recebe este nome devido à sua morfologia espiral. Galáxias são conjuntos de estrelas, poeira, gases, satélites e matéria escura que formam o universo;

Hidrocarboneto: Composto químico constituído por átomos de carbono e hidrogênio;

Isótopo: Átomos de um mesmo elemento químico que possuem a mesma quantidade de prótons, mas se diferenciam pelo número de nêutrons;

Meteoroide: pequeno corpo que orbita o Sol;

Nebulosa: Grandes nuvens de poeira e gases como hidrogênio e hélio. Podem ser formadas através da explosão de estrelas massivas que ejetam seu material ao final das suas vidas.

Planeta anão: Termo criado pela União Astronômica Internacional (UAI) para definir uma classe de corpos celestes que não possuem o tamanho de planetas nem de objetos menores.

Radiação cósmica de fundo: Sinal eletromagnético de origem cosmológica que preenche o universo e pode ser observado no céu.

Raio cósmico: Partículas extremamente penetrantes e com energia elevada vindas de diversas regiões do espaço. São majoritariamente constituídas de prótons e outros núcleos atômicos.

Relatividade geral: Teoria geométrica de gravitação que compreende que o espaço e o tempo formam um tecido e se curvam através da ação da gravidade.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

BOCZKO, R. Conceitos de Astronomia. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1984.

GALANTE, D. et al. Astrobiologia: uma ciência emergente. São Paulo: Tikinet Edição, 2016.

GRADY, M.; PRATESI, G.; CECCHI, V. M. Atlas of Meteorites. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

HAWKING, Stephen. Uma Breve História do Tempo. Editora Intrínseca, 2015.

OLIVEIRA FILHO, K. D. S.; SARAIVA, M. DE F. O. Astronomia e Astrofísica. Porto Alegre: Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

TIBERIO, C. T. Estudo das Concepções dos Estudantes do Ensino Fundamental sobre Astronomia, Meteorítica e Astrobiologia e uma Proposta de Material Didático. Trabalho de Conclusão de Curso - São Carlos - SP: Universidade Federal de São Carlos, 2023.

ZUCOLOTTO, M. E.; FONSECA, A. C.; ANTONELLO, L. L. Decifrando os Meteoritos. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro - Museu Nacional, 2013.

IMAGENS

- 1) **Wilhelm Olbers**: <https://www.britannica.com/biography/Wilhelm-Olbers>.
- 2) **Edwin Hubble**: <https://www.britannica.com/biography/Edwin-Hubble>.
- 6) **Formação do Sistema Solar**: <http://nupic.fe.usp.br/evolucao-sistema-solar/>.
- 9) **Meteorito condrito**: Wiki Commons.
- 14) **Possíveis fósseis no meteorito marciano**: <https://www.britannica.com/topic/ALH84001>.
- 15) **Meteorito marciano**: <https://curator.jsc.nasa.gov/antmet/mmc/alh84001.pdf>.
- 17) **Meteorito ferro-rochoso**: https://pt.wikipedia.org/wiki/Meteorito_ferroso-rochoso.
- 14) **Fauna ediacarana**: <https://eartharchives.org/articles/the-secret-garden-of-ediacara-and-the-origin-of-complex-life/>.
- 21) **Alexandr Oparin**: Wikimedia.
- 22) **J. B. S. Haldane**: <https://www.marxists.org/portugues/haldane/index.htm>.
- 23) **Estromatólitos atuais**: Wikimedia Estos_son_lo_estromatolitos.
- 24) **Estromatólitos fósseis**: <https://evosite.ib.usp.br/evo101/IIIE2aOriginoflife.shtml>.
- 25) **Eras geológicas**: <https://portalacademico.cch.unam.mx/interactivos/eras-geologicas/>.
- 27) **Côndrulos**: Wikimedia: Carbonaceous chondrite (Allende Meteorite) (4.560-4.568 Ga) 9.jpg.
- 28) **Regmaglitos**: Wikimedia: SikhoteAlinMeteorite.jpg.
- 29) **Presença de metal**: Wikimedia: Ordinary chondrite (Viñales Meteorite) 16.jpg.
- 31) **Micrometeorito**: <https://profpt.srt.ifsp.edu.br/index.php/component/content/article/59-insercao-social/177-cifct>.
- 32) **Estruturas de Widmanstätten**: https://es.wikipedia.org/wiki/Estructura_de_Widmanst%C3%A4tten.

Acesso em março de 2023.



FIM.