

# Nossa vizinhança cósmica: o Sistema Solar

Daniela Lazzaro

Observatório Nacional

---

## Resumo

O Sistema Solar e seus inúmeros e distintos corpos constituem a vizinhança de nosso lar, a Terra. Neste texto além de fazer uma descrição geral dos objetos que conhecemos até o momento também procuramos ressaltar as semelhanças e diferenças entre eles e o que isso nos diz com respeito a sua formação e/ou evolução. Ressaltamos que embora os corpos do Sistema Solar sejam os que melhor conhecemos de todo o imenso universo que nos cerca ainda assim existem muitas perguntas sem uma resposta satisfatória e que surgem como desafios para o futuro.

## Abstract

The Solar System and its countless and distinct bodies compose the neighborhood of our home, the Earth. In this text beside performing a general inventory of the objects presently known we also highlight the similarities and differences among them and what this tells us regarding their formation and/or evolution. Although the Solar System bodies are the best that we know of all the immense universe around us, even though many questions are still lacking a satisfactory answer and appear as challenges for the future.

---

**Palavras-chave:** Sistema Solar; planetas e pequenos corpos; formação e evolução.

**Keywords:** Solar System; planets and minor bodies; formation and evolution.

DOI: [10.47456/Cad.Astro.v5n2.45465](https://doi.org/10.47456/Cad.Astro.v5n2.45465)

## 1 Introdução

A Terra não é um corpo isolado, vagando no infinito do cosmos, mas faz parte de um conjunto que denominamos de Sistema Solar. Este pode ser definido como sendo composto por aqueles corpos que estão sob a influência gravitacional do Sol. Isso faz com que o Sistema Solar se estenda até cerca de dois anos-luz do Sol, ou seja, da ordem de 10 trilhões de quilômetros, ou 100 mil UA.<sup>1</sup> Entretanto, nosso conhecimento não chega até tão longe, já que até o momento somente conseguimos observar diretamente corpos até cerca de 50-100 UA apesar de saber que muitos cometas provêm de muito mais longe. Isso indica que nosso conhecimento é limitado à região mais próxima do Sol, onde uma miríade de corpos, grandes e pequenos, constituem nossa vizinhança cósmica.

O avanço do conhecimento sobre os diversos corpos do Sistema Solar pode ser descrito por

---

<sup>1</sup>Unidade Astronômica, UA, é definida como a distância média entre a Terra e o Sol, sendo que 1 UA equivale a 148 milhões de quilômetros.

três fases distintas. A primeira se iniciou com o próprio homem e seu fascínio pelo céu estrelado. Além da mudança das estações, relacionadas diretamente com o Sol, a observação do movimento lento e imutável das estrelas levou à identificação de corpos em movimento entre estas: os “planetas”. Os planetas, termo que em grego significa “errante”, se pareciam com estrelas, mas com movimento diferente.

A segunda fase veio com a revolução científica, nos séculos 16 e 17. A partir de observações sistemáticas, pesquisadores como Tycho Brahe, Johannes Kepler, Galileo Galilei e Isaac Newton descreveram as trajetórias dos diversos corpos do Sistema Solar e as forças que governam seus movimentos. Foi nesta época também que as observações começaram a ser feitas utilizando um novo invento: o telescópio!

A terceira, e atual, época é a da exploração espacial. Seu início pode ser associado à primeira imagem da “face oculta da Lua”, obtida em outubro de 1959 pela sonda russa Luna 3. Desde então nossa vizinhança tem sido explorada por sondas

que já visitaram todos os planetas, além de inúmeros pequenos corpos, realizando experimentos tão diversos quanto esgarçar uma superfície, recolher e trazer para a Terra amostras, provocar a formação de uma cratera e até mudar a trajetória do corpo.

A exploração espacial confirmou quanto distintos entre si são os corpos do Sistema Solar, tanto no que se refere à suas atmosferas, superfícies e estruturas geológicas quanto às evoluções fisico-dinâmicas pelas quais passaram. Essa grande diversidade complica a obtenção de modelos que consigam descrever a formação de todos os corpos e explicar o surgimento da vida na Terra.

No que segue vamos iniciar descrevendo os diversos corpos que compõem o Sistema Solar, em seguida vamos descrever o modelo atualmente mais aceito para sua formação e vamos finalizar detalhando as principais similaridades e diferenças existentes entre os corpos, tanto os grandes quanto os pequenos (para maiores detalhes, ver [1–3]).

## 2 Um inventário do Sistema Solar

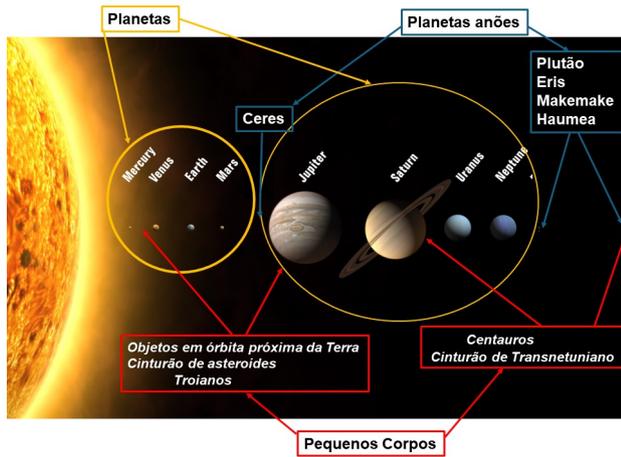
Antes de passar a descrever os corpos que compõem o Sistema Solar é importante deixar claro que esse inventário estará incompleto. Isso porque o Sistema Solar não é nem estático e nem fechado, com colisões gerando novos fragmentos, objetos interestelares podendo atravessar nosso sistema planetário e novos objetos, geralmente menores e/ou mais distantes, sendo descobertos todos os dias. Portanto, é de se esperar que tanto as melhorias tecnológicas quanto as missões espaciais, levarão à descoberta de objetos diferentes nos obrigando a mudar a forma como os classificamos. Isso já ocorreu no passado e não tenhamos dúvidas de que irá ocorrer no futuro! Como exemplo podemos lembrar a classificação de Plutão não mais como planeta a partir da descoberta de outros corpos em suas proximidades, sendo que muitos de tamanho comparável. Nada de dramático, apenas uma mudança de “caixa” para este corpo. E como as “caixas” somos nós que as criamos a partir do que conhecemos, então nada mais normal do que criar caixas ou mudar alguns objetos de caixa. Vamos então descrever as “caixas” que contém os corpos do Sistema Solar atualmente

conhecidos (Figura 1).

A primeira contém apenas um corpo: o Sol. Este é uma estrela relativamente normal podendo ser descrita como uma enorme bola de gás incandescente com 1,4 milhões de quilômetros de diâmetro. Sua temperatura superficial é de cerca de 6000 graus enquanto sua temperatura central supera alguns milhões de graus. A principal característica do Sol é a de concentrar 99,8% de toda a massa do Sistema Solar. Isso faz com que a trajetória de todos os corpos seja regida pela atração gravitacional do Sol, como descrito por Kepler e Newton, apenas sendo perturbada, em maior ou menor grau, pelos demais. Além do mais, todos os corpos são aquecidos basicamente pela radiação do Sol a qual diminui com a raiz quadrada da distância, ou seja, quanto mais distante mais frio.

A segunda caixa é a dos planetas com oito corpos: Mercúrio, Vênus, Terra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano e Netuno. A maioria dos planetas é conhecida desde a antiguidade sendo que apenas Urano e Netuno foram descobertos com o uso de telescópios (em 1781 e em 1846). De acordo com a União Astronômica Internacional um planeta é um corpo celeste que (a) está em órbita em torno do Sol, (b) tem massa suficiente para atingir uma forma de equilíbrio hidrostático (ou seja, aproximadamente redonda), e (c) tem esvaziado a região vizinha à sua órbita. Em outras palavras, os planetas são aqueles corpos que dominaram gravitacionalmente as regiões ao seu redor fazendo com que todo outro corpo em sua vizinhança fosse ou capturado ou expelido para longe.

Todos os planetas têm órbitas quase-circulares e aproximadamente coplanares, em distâncias do Sol que vão de 0,4 até 30 UA. Outra característica é a de que todos os planetas giram em torno do Sol numa única direção a qual é a mesma da rotação de cada planeta em torno de seu eixo (com exceção de Vênus que tem uma rotação dita retrógrada atribuída possivelmente a uma colisão). Em termos de composição os elementos mais abundantes são o Hidrogênio e o Hélio, com um pouco de Oxigênio e de Carbono além de traços de Neônio, Nitrogênio, Magnésio, Silício, Ferro e alguns outros. Como veremos mais adiante, todas essas características são indicativas do processo de formação a partir do colapso



**Figura 1:** As diferentes classes, ou “caixas”, do Sistema Solar.

de uma nuvem de gás e poeira em rotação.

Os quatro planetas mais próximos do Sol, de Mercúrio até Marte, são denominados de planetas internos ou terrestres ou, ainda, telúricos. São mundos relativamente pequenos, aquecidos por sua proximidade com o Sol e compostos basicamente por rochas e metais. Todos têm superfícies sólidas que guardam registros dos processos geológicos atuantes no planeta que levaram à formação de crateras, montanhas e vulcões. Os quatro planetas logo a seguir, de Júpiter até Netuno, são bem maiores embora sendo compostos de materiais mais leves como o Hidrogênio e o Hélio, na forma de gás, gelo e líquido. Estes são chamados de planetas externos, ou gigantes, ou, ainda, jovianos.

Outra caixa, criada apenas em 2006, é a dos planetas anões. Assim como os planetas, são corpos em órbita em torno do Sol e que atingiram um tamanho tal a ter uma forma aproximadamente redonda, mas que falharam em esvaziar a região ao seu redor. Nesta categoria está o primeiro, e maior, corpo descoberto na região entre Marte de Júpiter, (1) Ceres. Também estão nesta caixa (134340) Plutão, o mais famoso, além de (136108) Haumea, (136199) Eris e (136472) Makemake, todos localizados no chamado Cinturão Transnetuniano, além de 30 UA. Vale aqui mencionar que foi exatamente a descoberta de que Eris tinha um tamanho aproximadamente igual ao de Plutão que levou à discussão sobre qual seria a definição de um planeta do Sistema Solar. Curiosamente, “Eris” na mitologia grega era a deusa da

discórdia, nome muito apropriado para um corpo cuja descoberta acabou resultando na criação de uma nova caixa de corpos e na mudança de classificação de Plutão.

A quarta caixa, é a dos pequenos corpos que abrange todos aqueles objetos que estão em órbita em torno do Sol, mas que não se encaixam em nenhuma das classes acima. Representam uma fração muito ínfima de toda a massa do Sistema Solar, mas seu número é quase infinito com tamanhos indo desde centenas de quilômetros até grãos de poeira. Os pequenos corpos podem ser divididos em muitas populações distintas, seja quanto à sua localização atual, sua aparência ou sua origem. Considerando a sua localização, podem ser divididos entre: objetos em órbita próxima da Terra, ou NEO do inglês Near Earth Objects, asteroides, entre as órbitas de Marte e Júpiter, Troianos, na mesma órbita de Júpiter, Centauros, em órbitas cruzadoras dos planetas gigantes, objetos Transnetunianos (TNO), em órbitas além de Netuno, e cometas, estes vindo dos confins do Sistema Solar, de um reservatório chamado de Nuvem de Oort e se distribuindo até as regiões mais internas.

Se considerarmos sua aparência, podemos dividir os pequenos corpos entre os inativos e os ativos. Os primeiros têm uma aparência pontual, tipo uma estrela, enquanto os segundos uma aparência difusa, resultante de presença de uma atmosfera difusa, chamada de coma, e, às vezes, uma cauda. Até alguns anos atrás chamávamos de asteroides os primeiros e de cometas os segundos, mas a descoberta de atividade tipo cometária em alguns asteroides assim como a de cometas que deixaram de apresentar atividade mostrou que o cenário é bem mais complexo do que isso.

Por fim, outra forma de separar os pequenos corpos é quanto ao local de sua formação: objetos formados na parte mais interna do Sistema Solar, até a órbita de Júpiter, contém materiais refratários enquanto os da parte externa contém material volátil e gelos. Essa diferença em composição é também responsável pela atividade ou não de um corpo, embora essa não seja a única condição. É necessário que o corpo que tem gelos também esteja numa órbita que o leve a distâncias onde a temperatura permite a volatilização destes. Se um objeto permanecer em regiões onde

o gelo não é volatilizado, então nunca assumirá a aparência de um cometa. É importante também lembrar que a evolução dinâmica devido às perturbações gravitacionais dos planetas, pode acabar misturando corpos formados em regiões distintas se tornando praticamente impossível identificar seu local de formação. Outro ponto é que depois de muitas passagens nas proximidades do Sol, um cometa pode acabar extinguindo todos seus voláteis não apresentando mais atividade. É o que chamamos de cometa “morto”. Outra possibilidade é a formação de uma grossa crosta que impeça o calor de volatilizar os gelos no interior. A este chamamos de um cometa “dormente”. Ambos não apresentam atividade, apesar de terem sido formados nas regiões externas do Sistema Solar!

O Sistema Solar também é composto por inúmeros satélites. Sua principal característica é de que, diferentemente dos objetos descritos acima, não estão órbita em torno do Sol, mas sim de um planeta. Cada um dos planetas, com exceção de Mercúrio e de Vênus, possui um ou mais satélites. Atualmente existem mais de 300 satélites catalogados em torno de planetas e provavelmente muitos outros menores ainda restam a serem descobertos. Estes têm tamanhos variando entre pequenos planetas e alguns metros. Entre os maiores podemos citar: a Lua, os quatro satélites maiores de Júpiter (chamados de Galileanos), Titan, satélite de Saturno, e Tritão, satélite de Urano. Todos os planetas anões, com exceção de (1) Ceres, e muitos pequenos corpos também têm um ou mais satélites. Dactyl, pequeno satélite do asteroide (243) Ida foi o primeiro a ser descoberto em 1993 pela sonda Galileo da NASA e hoje o número em torno de pequenos corpos já se aproxima de 500.

Quimicamente e estruturalmente a Lua é muito similar à própria Terra, mas isto não é a regra entre os demais sistemas de satélites. A maioria dos satélites dos planetas externos têm composição similar ao núcleo do planeta que orbitam e não ao próprio planeta. Os três maiores satélites, Ganimedes, Callisto e Titan, são compostos metade de gelo de água e metade de rochas e de metais. Estes corpos diferenciaram facilmente nos primórdios da formação planetária já que tiveram que atingir apenas a temperatura de derretimento do gelo. Hoje em dia estes satélites têm densas su-

perfícies de gelo muito duro e um interior composto de rochas e de metais. Origens diversas são invocadas para explicar os diferentes sistemas de satélites. Acredita-se que os satélites em órbitas quase circulares e no plano do equador do planeta tenham sido formados a partir de um disco de material circumplanetário, sendo os satélites Galileanos o melhor exemplo. Por outro lado, satélites em órbitas altamente inclinadas ou excêntricas devem ter sido capturados após a formação do planeta por sua gravidade, como exemplo podemos citar os dois satélites de Marte, Phobos e Deimos.

Por fim temos os anéis. Inicialmente identificados apenas em torno de Saturno, hoje sabemos que todos os planetas gigantes e até Centauros e TNO têm anéis. Os anéis são compostos por um imenso número de pequenos corpos de tamanhos variando entre um grão de areia e uma montanha, cada um seguindo órbitas independentes uma da outra ao redor do planeta.

Os anéis em torno dos diversos planetas são muito distintos, tanto em composição quanto em tamanho das partículas. O sistema de anéis de Saturno é o mais brilhante, também tendo sido o primeiro ser descoberto pelo matemático e astrônomo neerlandês Christiaan Huygens, em 1655. Talvez seja aqui importante mencionar que antes de Huygens, Galileo Galilei já tinha percebido que Saturno não tinha uma forma esférica embora não tenha chegado a propor a existência de um anel mas de dois satélites, estranhamente fixos. Os anéis de Saturno são largos e opticamente espessos, compostos por partículas de gelo de água com tamanho entre centímetros e metros. Apenas os mais externos são tênues e compostos por grãos de gelo de tamanho micrométrico. Os anéis de Júpiter são extensos, mas muito tênues e compostos basicamente de grãos de silicato de tamanho micrométrico. Por esse motivo, somente foram descobertos em 1979 quando da passagem da sonda Voyager 1, da NASA. Em torno de Urano existem anéis estreitos com partículas similares às dos principais anéis de Saturno enquanto em Netuno o principal anel é estreito e com grandes variações longitudinais, e os demais são tênues e alargados. Tanto os anéis de Urano quanto de Netuno foram descobertos apenas em 1977 e em 1984 pela técnica de ocultação estelar a qual consiste em monitorar o brilho de uma estrela enquanto um

corpo do Sistema Solar “passa na sua frente”. Foi com essa técnica também que em 2014 foi descoberto o primeiro sistema de anéis em torno de um pequeno corpo, o Centauro (10199) Chariklo. Mais recentemente, pela mesma técnica, tem sido detectada a presença de anéis em torno de alguns outros Centauros e TNO.

### 3 A formação e evolução do Sistema Solar

A formação do Sistema Solar é, sem dúvida, uma das questões que sempre fascinou o homem. A procura por um modelo compatível com as observações tem sido responsável pela elaboração de mais do que 50 teorias nos últimos 300 anos. Estas podem ser divididas em três tipos básicos: turbulentas, catastróficas ou nebulares.

A primeira teoria científica sobre a formação do Sistema Solar foi elaborada por René Descartes em 1644. Ele postulou um sistema de vórtices imersos em um meio cheio de um misterioso “éter” os quais dariam então origem ao Sol e aos planetas. Uma variante mais recente deste modelo propõe a existência de uma atmosfera turbulenta e em rotação em torno do Sol a qual daria origem aos planetas. O problema aqui é quanto aos processos físicos, ainda em discussão, que seriam responsáveis por dar origem as turbulências.

O segundo tipo de teoria, a catastrófica, foi inicialmente formulada por George Luis de Buffon, em 1765. Segundo esta teoria, a colisão de um cometa com o Sol teria retirado parte de matéria do Sol a qual foi posteriormente se condensando e formando os planetas. Na época acreditava-se que os cometas eram corpos com muita massa, mas hoje sabemos que estes são muito pequenos e compostos por gelos, logo, uma colisão com o Sol não teria a menor consequência. Aliás, hoje se conhece uma classe de cometas, os chamados sun-grazers, que colidem com o Sol e ninguém nem percebe! Esta teoria foi revista em 1916 por James Jeans e Harold Jeffreys, considerando que a colisão se daria com uma outra estrela. E nem precisaria ter ocorrido propriamente uma colisão, pois uma grande aproximação entre as duas estrelas já teria sido suficiente para “arrancar” uma grande quantidade de matéria do Sol. O problema com essa teoria é de que a aproximação das duas estrelas produziria inicialmente um gás

muito quente o qual se expandiria mais rapidamente do que conseguiria se condensar impossibilitando, portanto, a formação de corpos frios, os planetas.

O terceiro tipo de teoria, a nebular, foi proposta independentemente por Emmanuel Kant, em 1755, e por Pierre Simon de Laplace, em 1796, sendo hoje conhecida como a hipótese de Kant-Laplace. Por esta teoria existiria uma nuvem difusa em rotação lenta, chamada de nebulosa proto-solar. Devido à auto gravidade a nuvem teria se contraído gradualmente aumentando a velocidade de rotação até o ponto da força centrífuga ejetar anéis de matéria. Posteriormente, esses anéis teriam se condensado, formando os planetas. Esta teoria foi sendo refinada ao longo dos anos passando a ser a mais aceita e sendo hoje conhecida como o “modelo padrão” de formação do Sistema Solar.

É importante ressaltar de que qualquer teoria de formação deve ser capaz de reproduzir as características observadas do Sistema Solar sendo que as principais são: 1) todos os planetas giram em torno do Sol numa mesma direção e o Sol, por sua vez, gira em torno de seu eixo na mesma direção do movimento dos planetas; 2) todos os planetas, com exceção de Vênus, giram em torno de seu eixo nesta mesma direção;<sup>2</sup> 3) todas as órbitas dos planetas são quase-circulares e coplanares, com exceção daquela de Mercúrio que é ligeiramente excêntrica; 4) a composição química indica que, apesar de variações dependendo da distância ao Sol, todos os corpos têm uma composição muito similar e uma única idade de solidificação, ou seja,  $4,55 \times 10^6$  anos; e 5) 99,8% de toda a massa do Sistema Solar está concentrada no Sol, enquanto o momento angular está nos planetas, mais precisamente, em Júpiter.

Todas as características observadas são reproduzidas pelo modelo padrão considerando que o Sistema Solar teria se formado a partir do colapso de um pequeno aglomerado de gás e poeira dentro de uma nuvem molecular gigante em rotação, talvez devido a onda de choque provocada pela explosão de uma supernova. Este aglomerado, formado por gás de hidrogênio e hélio, estaria en-

<sup>2</sup>O eixo de rotação de Urano também se distingue do padrão dos outros planetas por estar inclinado em relação à eclíptica de um ângulo de 98°, o que faz com que a rotação pareça retrógrada, não o sendo na realidade.

riquecido com uma pequena quantidade de elementos mais pesados, remanescentes da explosão de antigas gerações de estrelas. O sistema assim formado teria uma rotação única, uma composição única e uma única idade, ou seja, satisfazendo a maioria dos dados observacionais. Mais ainda: na medida que a nuvem proto-solar colapsa, a matéria vai se distribuindo num disco fino dentro do qual a massa é transferida para o centro, formando o Sol, enquanto o momento angular é transferido para a periferia, conforme observado.

Tendo um disco, resta definir como foram formados os planetas. Basicamente você tem duas formas: ou quebrando o disco em oito pedaços ou formando os oito corpos juntando pedacinhos menores do disco. Estas duas possibilidades deram origem a duas teorias principais. A primeira, propõe que instabilidades gravitacionais foram se formando num disco com massa da ordem da massa do Sol. Estas instabilidades deram então origem a proto-planetas, os quais foram capturando mais matéria até se tornarem os planetas de hoje. Este modelo, desenvolvido pelo astrofísico canadense Alastair Cameron em 1969, passou a ser conhecido como “de grande massa”, já que para iniciar instabilidades gravitacionais é necessário se ter muita massa no disco. O problema é que como a massa de todos os planetas hoje não passa de 0,01% daquela do Sol é necessário que a massa excedente tenha sido expelida por algum processo que ainda não está muito bem conhecido.

A segunda, também formulada em 1969, mas pelo astrofísico russo Viktor Safronov, propõe que os planetas se formaram a partir da condensação do gás com os grãos de poeira existentes no disco. Este processo foi formando corpos de tamanhos variando entre alguns microns até alguns centímetros os quais foram posteriormente se aglutinando e formando corpos maiores, entre metros e alguns quilômetros, chamados de planetesimais. A aglutinação se deu a partir de suaves colisões dos planetesimais em rotação no disco. Por este modelo é possível formar os planetas a partir de um disco com uma massa da ordem de 0,01 da massa do Sol, ou seja, bem próxima daquela atual dos planetas e não sendo necessário invocar nenhum outro processo que expulse a massa excedente. Entretanto, é importante ressaltar que este processo implica no crescimento de 45 ordens de grandeza em massa através de dife-

rentes processos físicos tão distintos como condensação, dissipação pelo gás, radiação, espalhamento gravitacional, colisões etc.

Vale aqui mencionar, que na região entre Marte e Júpiter os planetesimais não chegaram a se juntar em mais um planeta. Acredita-se que isto foi devido à rápida formação de Júpiter num corpo de grandes dimensões. Isto teria gerado perturbações gravitacionais que aumentaram as excentricidades das órbitas dos objetos na região. Os encontros passaram então a se dar em altas velocidades favorecendo a fragmentação e não mais a acreção. Na região mais externa, além de Netuno, o material, em menor densidade, foi também se aglutinando em muitos corpos maiores formando o que hoje conhecemos como Cinturão Transnetuniano.

Obviamente, muitos pontos do modelo padrão ainda precisam de estudos mais detalhados, mas este consegue descrever os processos básicos da formação do Sistema Solar e reproduzir as principais características observadas. Entretanto, um modelo científico não deve apenas estar de acordo com os dados, mas deve também propor alguma nova observação que comprove que o modelo está correto. Quanto ao modelo padrão este traz embutida uma hipótese fundamental: o processo pelo qual o Sistema Solar se formou é um processo comum de formação estelar. Logo, ele propõe que deveríamos encontrar não apenas muitos outros sistemas planetários, mas também muitos objetos nos estágios intermediários da formação. E isto vem sendo comprovado nas últimas décadas! Na Nebulosa Orion tem sido observada a formação de estrelas a partir do colapso de pequenas nuvens. A descoberta do disco de poeira de  $\beta$ -Pictoris assim como de muitos outros discos protoplanetários têm comprovado a existência desta fase na formação planetária. Por fim, em 1995 foi descoberto o primeiro planeta em torno de outra estrela e hoje já se conhecem mais de mil de planetas extrassolares, ou exoplanetas. Logo, o “modelo padrão” não apenas está de acordo com o que é observado no Sistema Solar, mas também é bem-sucedido em suas previsões. Talvez seja bom aqui mencionar que a maioria dos exoplanetas descobertos até o momento difere muito daqueles do nosso Sistema Solar, devendo ter tido uma formação diferente. Entretanto, acredita-se que isto se deva principalmente as limitações tec-

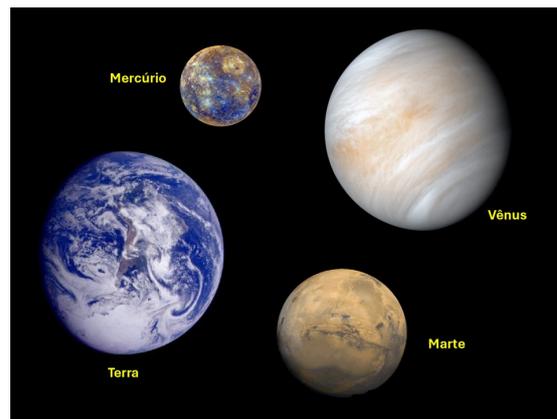
nológicas atuais, as quais ainda não nos permitiram observar sistemas planetários similares ao Solar.

Para finalizar é importante lembrar que o Sistema Solar não é estático, ou seja, está em contínua evolução já que os corpos interagem tanto devido à interação gravitacional quanto a colisões. Também podemos pensar que os planetas podem não ter se formado nas posições em que se encontram hoje em dia, mas foram evoluindo até estas. Vale lembrar que os planetas se formaram dentro de um disco composto por uma miríade de planetesimais. Estes pequenos corpos devem ter interagido gravitacionalmente com os planetas levando a se deslocarem lentamente ao longo do tempo. É o que chamamos de migração planetária devido à troca de momento angular entre planetesimais e planetas em formação. Nos últimos 20 anos a teoria de Nice, como ficou conhecida por ter sido elaborada por pesquisadores no Observatório de Nice (França), e suas inúmeras variantes, tem tentado reproduzir a configuração atual dos planetas e pequenos corpos a partir de configurações iniciais diferentes das atuais. Modelos com nomes sugestivos como “Júpiter Saltitante” ou a “A Grande Tacada” tem procurado reproduzir o atual Sistema Solar utilizando ou mais planetas nos estágios finais da formação, ou uma distribuição inicial mais próxima ao Sol, ou a presença do gás enquanto o sistema ainda não estava em sua forma final. Provavelmente, muitas outras teorias ainda surgirão já que o que temos são apenas informações sobre o estágio atual e não o inicial, mas os princípios básicos do modelo padrão não deverão mudar.

#### 4 Os planetas: diferenças e similaridades

Conforme descrito acima, os planetas do Sistema Solar estão classificados numa mesma “caixa” sendo apenas divididos entre os terrestres e os gigantes. Mas, tanto uns quanto os outros, apresentam algumas similaridades e muitas diferenças quando comparados entre si.

Vamos começar pelas similaridades entre os planetas terrestres (Figura 2). Todos têm uma composição de rochas e metais, sendo que a Terra, Vênus e Marte têm aproximadamente a mesma composição com cerca de 2/3 de silicatos e 1/3



**Figura 2:** Os quatro planetas terrestres aproximadamente em escala: Mercúrio, Vênus, Terra e Marte.

de metais (combinações de ferro e de níquel ou de enxofre) e apenas Mercúrio tem, proporcionalmente, mais metais. Os materiais mais densos, os metais, estão situados em suas partes centrais. Esta estrutura interna, chamada de diferenciada, nos indica que em algum momento esses corpos foram aquecidos até o ponto fusão permitindo aos materiais mais pesados irem para o fundo. Devido à pouca quantidade de hidrogênio presente, estes planetas exibem uma grande variedade de compostos de oxigênio.

Quanto às diferenças, estas são muitas! Mercúrio, o menor e mais interno, tem uma atmosfera muito tênue, uma superfície saturada de crateras e uma rotação muito lenta (1 dia “mercuriano” tem a duração de cerca 176 dias terrestres) o que acaba levando a uma grande variação da temperatura superficial entre quase 200 graus negativos e 400 graus positivos. Por outro lado, Vênus, tem uma atmosfera muito densa, composta essencialmente de dióxido de carbono e enxofre, que gera um efeito estufa extremo não deixando o calor escapar e elevando a temperatura superficial até mais do que 400 graus. Apresenta uma superfície sem crateras e com indícios de atividade vulcânica passada e, talvez, até presente. A nossa casa, a Terra tem uma atmosfera com densidade ideal e efeito estufa moderado o que permite tanto a presença de água líquida na superfície quanto uma proteção contra impactos de corpos vindos do espaço. O movimento das placas tectônicas, único em todo o Sistema Solar, é responsável pelo chamado ciclo do carbono que mantém o equilíbrio da temperatura. Por fim, Marte tem uma tênue atmosfera fazendo com que a temperatura

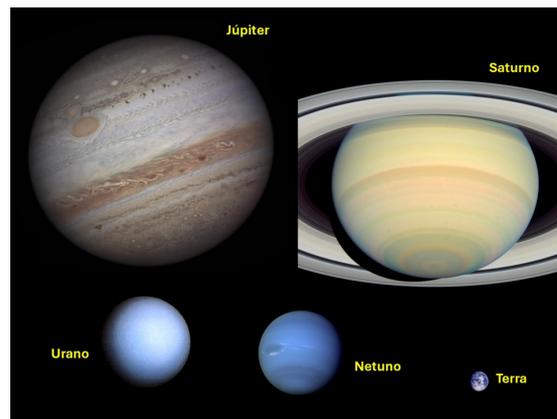
superficial tenha grandes variações entre o dia e a noite. Atualmente é impossível existir água líquida em sua superfície, mas esta deve ter estado abundante no passado conforme indicam várias estruturas formadas por grandes fluxos de material líquido.

As superfícies de todos os planetas terrestres têm sido modificadas ao longo dos tempos por forças internas e externas. Cada planeta tem sido bombardeado por projeteis vindo do espaço os quais, em geral, deixam as superfícies recobertas de crateras. Embora tenhamos indicações de que este bombardeamento tenha sido muito mais intenso nos primórdios do Sistema Solar, perdura até hoje. Provas recentes disto foram a colisão do cometa Shoemaker-Levy 9 com Júpiter, em meados de 1994, e o bólido que caiu em Chelyabinsk (Rússia) em 2013.

Forças internas, por outro lado, têm modelado as superfícies planetárias através da formação de montanhas, da erupção de vulcões e da violência dos terremotos e maremotos. Estas estruturas são devidas ao que chamamos de atividade geológica de um planeta. A Terra e Vênus são os planetas que têm, ou tiveram, o maior nível de atividade geológica. Apenas um corpo em todo o Sistema Solar é mais ativo: o satélite Io, de Júpiter, mas isto graças a movimentos de maré devido à proximidade com Júpiter. Por outro lado, Marte e Mercúrio, são mundos completamente mortos.

Estes diferentes graus de atividade geológica se devem a um interior quente. Os vulcões, assim como as montanhas, são resultantes do calor escapando do interior de um planeta. Este calor interno foi obtido durante o processo de formação dos planetas e, por este motivo, é chamado de primordial. Entretanto, quanto menor for um planeta, mais facilmente vai perder o calor interno e se tornar inativo. Isto foi o que, muito provavelmente, aconteceu com Mercúrio e Marte. Este último apesar de apresentar indícios de ter tido uma considerável atividade interna, esta cessou completamente.

Por terem sido formados numa região relativamente próxima, entre 0,4 e 1,5 UA do Sol, não se acredita que as diferenças observadas nos planetas terrestres sejam devidas à sua formação, mas sim a evoluções distintas. Por exemplo, as observações indicam que todas as atmosferas não



**Figura 3:** Os quatro planetas gigantes aproximadamente em escala: Júpiter, Saturno, Urano e Netuno. No canto direito, também aproximadamente em escala, a Terra.

foram capturadas da nebulosa solar na formação. Estas atmosferas, ditas secundárias, foram formadas por diversos processos tais como: durante a fase de acreção quando impactos causaram grande aquecimento, ou pelo impacto de pequenos corpos ricos em voláteis, ou através de uma contínua atividade vulcânica. No caso de Vênus, entretanto, o efeito estufa extremo levou a que a atmosfera se tornasse espessa demais levando a um aquecimento secular da superfície. Por outro lado, Marte não conseguiu reter a atmosfera nem a água líquida em sua superfície devido à sua pequena massa.

Entre os planetas gigantes Júpiter e Saturno, têm aproximadamente a mesma composição do que o Sol, consistindo basicamente em hidrogênio e hélio, numa proporção de 75% o primeiro e 25% o segundo. Às vezes são chamados de planetas gasosos já que na Terra estes dois elementos assumem o estado de gás. Na verdade, isto é incorreto já que, devido ao seu grande tamanho o gás no interior destes planetas é comprimido a tal ponto que o hidrogênio passa ao estado líquido. Num planeta líquido ou gasoso, devido à força da gravidade, os elementos mais pesados tendem a cair para o fundo, ou melhor, para o centro. Isto é o que ocorre tanto em Júpiter quanto em Saturno os quais têm núcleos compostos de rochas e metais.

Urano e Netuno apesar de bem menores do que Júpiter e Saturno (Figura 3), também têm núcleos compostos de rocha e de metal. Um aspecto interessante é de que o tamanho do núcleo dos quatro planetas gigantes ser aproximada-

mente igual, ou seja, cerca de dez vezes o tamanho da Terra. Isto parece indicar que os quatro planetas começaram a ser formados iguais e apenas posteriormente capturaram hidrogênio e hélio para formar suas atmosferas. Neste caso, Urano e Netuno não foram tão eficientes quanto Júpiter e Saturno e permaneceram de menor tamanho.

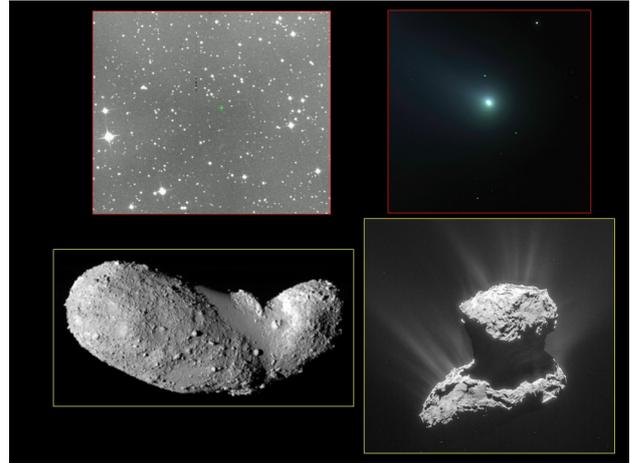
Estes quatro planetas têm uma composição dominada por hidrogênio e seus compostos. Todo o oxigênio disponível se combina quimicamente com o hidrogênio para formar água ( $H_2O$ ). Os demais compostos presentes nestes planetas são o metano ( $CH_4$ ) e o amônio ( $NH_3$ ), além de hidrocarbonetos tais como o etano ( $C_2H_6$ ) e o acetileno ( $C_2H_2$ ). As nuvens superiores de Júpiter e Saturno são compostas por cristais de amônio enquanto as de Urano de metano. É este último composto responsável pela coloração azulada deste planeta.

No caso dos planetas gigantes, o que os caracteriza é sua energia interna. O próprio Júpiter emite tanto calor interno quanto o que recebe do Sol. Neste caso a energia interna é ainda aquela adquirida durante a formação, ou seja, a primordial. Por outro lado, Saturno gera energia interna devido a um processo de diferenciação que consiste na segregação do hélio e do hidrogênio. Sendo o hélio mais pesado, pequenas gotículas deste elemento vão caindo na direção do núcleo e neste processo geram calor. Netuno também tem uma pequena energia interna enquanto Urano não. Isto faz com que os dois planetas tenham a mesma temperatura mesmo que Netuno esteja a uma maior distância do Sol.

Portanto, conforme podemos ver, mesmo estando numa mesma “caixa” os planetas são muito diferentes entre si. O mesmo pode ser dito dos pequenos corpos, como detalharemos a seguir.

## 5 A complexa miríade de pequenos corpos

Os cometas foram os primeiros corpos da vasta população de pequenos corpos a serem identificados e seus registros remontam ao período antes de Cristo. Esses corpos espetaculares, com grande brilho e longas caudas, em movimento em relação às estrelas fixas, apareciam de forma inesperada chegando a aterrorizar os homens os quais passaram a associá-los a tragédias sendo vistos como



**Figura 4:** Imagens de pequenos corpos, inativos e ativos, obtidas de telescópio na Terra e sondas espaciais. As duas imagens da parte de cima foram obtidas utilizando o Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica: na esquerda, o asteroide (10468) Itacuruba e, na direita, o cometa C/2020 F3 (NEOWISE). Na parte de baixo, na direita, imagem do asteroide (25143) Itokawa obtido pela sonda Hayabusa, da Agência Espacial Japonesa (JAXA) e, na esquerda, imagem do cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko, obtida pela sonda Rosetta da Agência Espacial Europeia (ESA).

sinais de mau agouro (Figura 4).

Apenas em inícios de 1801, outro pequeno corpo foi identificado entre as órbitas de Marte e Júpiter. Diferentemente dos cometas, este corpo, assim como os demais descobertos nos anos subsequentes nesta mesma região, tinha uma aparência igual a de uma estrela. Daí o nome de “asteroide” sugerido por W. Herschel em 1803 e que em latim quer dizer “quase-estrela”. Como nota histórica vale mencionar que estes pequenos corpos foram considerados planetas até cerca de 1845 quando já tinham sido descobertos cerca de 15 objetos na região. Com o passar do tempo as centenas e milhares de asteroides acabaram sendo classificados em diferentes grupos devido basicamente às suas propriedades dinâmicas. Em 1898, por exemplo, foi descoberto (433) Eros, o primeiro objeto de uma vasta população em órbitas próximas da Terra, os chamados NEO (do inglês Near-Earth Objects). Hoje definimos os NEO como aqueles objetos com periélio menor do que 1,3 UA e, em geral, afélio menor do que 5,2 UA, que define a órbita de Júpiter.

Mas novas populações de pequenos corpos não pararam de ser descobertas. Em 1977 G. Kuiper descobriu o “asteroide mais distante do Sistema

Solar”, Chiron. O tempo mostrou que este objeto, com órbita entre Saturno e Urano, não estava sozinho, e vários outros foram sendo descobertos em órbitas que cruzam aquelas dos planetas gigantes. Mas essa não era a única particularidade de Chiron, já que logo após sua descoberta foi observado um aumento de seu brilho, como no caso de cometas. Essa dualidade asteroide-cometa, levou a dar o nome de Centauro, meio-homem e meio-cavalo, a esta nova população de pequenos corpos. No caso específico de Chiron este passou a ter dupla denominação: o asteroide (2060) Chiron e o cometa periódico 95P/Chiron. A população dos Centauros é dinamicamente similar a dos NEO: as órbitas de ambas cruzam, ou se aproximam muito, daquelas dos planetas gigantes, os primeiros, ou dos terrestres, os segundos. Isto gera perturbações gravitacionais e instabilidades que fazem com que os corpos sejam ejetados de suas órbitas em intervalos de tempo menores do que a idade do próprio Sistema Solar. Como essas populações existem até hoje, isso indica que deve haver um contínuo fluxo de objetos indo tanto para a região dos NEO quanto a dos Centauros.

A descoberta dos objetos transnetunianos foi um pouco mais complicada. Em 1930 Clyde Tombaugh descobriu Plutão, sendo considerado como o nono planeta do Sistema Solar. Esta descoberta foi resultante de uma busca sistemática levada a cabo no Lowell Observatory (EUA) com o objetivo de encontrar mais um planeta que aparentemente estaria perturbando a órbita de Urano. Vale lembrar que a descoberta de Netuno, em 1846, se deu a partir de previsões matemáticas feitas por Urbain Le Verrier e John Adams, de um corpo que estaria perturbando a órbita de Urano. No caso de Plutão, entretanto, nenhuma previsão matemática conseguiu definir qual a localização do suposto planeta e sua descoberta foi fruto apenas de um mapeamento sistemático do céu. Como nota curiosa, vale mencionar que muitos anos mais tarde ficou comprovado que a órbita de Urano não sofria nenhuma perturbação além das já conhecidas sendo que os desvios observados em sua órbita se deviam apenas a erros devidos à utilização de massas incorretas para os planetas gigantes.

Mas vamos voltar aos TNO. Entre 1938 e 1949 o astrônomo irlandês Kenneth Edgeworth publicou uma série de artigos postulando a existência

de objetos além de Plutão a partir de considerações sobre a formação do Sistema Solar. Quanto ao próprio Plutão, Edgeworth o considerava pequeno demais para ser considerado um planeta e sugeria que seria um satélite que teria escapado da influência de Netuno. Em 1951 outro astrônomo, o americano Gerard Kuiper, também propõe a existência de um cinturão de corpos na região mais externa baseado no destino do material do disco além Netuno. Finalmente, em 1980 Julio Fernández, pesquisador uruguaio, estudando a origem dos cometas periódicos propõe que estes devem vir de um reservatório situado entre 35 e 50 UA no qual existiriam objetos do tamanho de Plutão. Desde 1976 inúmeras buscas sistemáticas tentaram identificar objetos nesta região o que somente acabou ocorrendo em 1992. O segundo transnetuniano descoberto foi (15760) Albion cuja denominação provisória era 1992 QB1 e que deu origem ao termo “cubewano” para os objetos que viriam a ser descobertos nesta mesma região. Hoje são conhecidos cerca de 3000 objetos na região, sendo que vários com tamanhos comparáveis ao de Plutão, conforme já previsto por J. Fernández.

Por fim, além de 10.000 UA se situa a Nuvem de Oort que é um reservatório dos cometas de longo período. O nome vem do astrônomo holandês Jan H. Oort que foi o primeiro a propor a existência de um reservatório englobando esfericamente todo o Sistema Solar. Este teria sido formado nos estágios finais da formação pelos pequenos corpos ejetados por interações gravitacionais com os planetas gigantes. Diversas perturbações gravitacionais, devidas tanto à nossa galáxia quanto à passagem de estrelas, fazem com que corpos acabem entrando no Sistema Solar interior em órbitas extremamente excêntricas e, em sua maioria, muito inclinadas. Essa diferença em relação as órbitas planetárias e dos demais pequenos corpos, todos com baixas excentricidade e inclinação, indica que seu local de origem não foi um disco.

## 6 Desafios

Apesar dos imensos avanços no conhecimento sobre nossa vizinhança cósmica, ainda muito resta a ser entendido e descoberto. Dois pon-

tos são, entretanto, fundamentais: entender todos os estágios de formação e evolução dos diferentes corpos do Sistema Solar e identificar os requerimentos necessários para o surgimento da vida. Entre as diversas questões a serem respondidas nas próximas décadas podemos mencionar:

1. Quais os estágios iniciais, as condições e os processos da formação do Sistema Solar e qual a natureza do material interestelar que foi incorporado?
2. Qual o papel da mistura de materiais na formação planetária? Existiu mistura em algum momento?
3. Como os planetas gigantes e seus sistemas de satélites conseguiram se formar? Será que migraram para locais diferentes de onde se formaram? E, se migraram, onde se formaram?
4. O que governou o suprimento de água, a química e a diferenciação interna dos planetas terrestres e a evolução de suas atmosferas? Será que as distintas evoluções foram devidas ao bombardeamento por grandes projéteis?
5. Quais as fontes primordiais do material orgânico e onde ainda é sintetizado hoje em dia?
6. Será que Marte ou Vênus abrigaram antigamente ambientes ricos em água que levou ao surgimento da vida? Existem evidências de que vida conseguiu emergir fora da Terra?
7. Será que existem outros lugares no Sistema Solar com as condições necessárias para manter a vida? Será que lá existem organismos vivos hoje em dia?

Como podemos ver mesmo sendo nossa vizinhança cósmica, o Sistema Solar ainda guarda muitos segredos e muito ainda resta a ser descoberto e entendido. A única certeza que podemos ter é de que os corpos do nosso sistema planetário são, de todo o imenso universo que nos rodeia, os que conhecemos em mais detalhe.

## Agradecimentos

O presente texto tem como base a pesquisa que tem sido realizada por mim e minha equipe ao longo dos anos com o inestimável apoio do CNPq (atualmente processo no. 310964/2020-2) e da FAPERJ (atualmente processo no. E-26/201.001/2021), pelo qual sou muito grata. Gostaria também de agradecer aos inúmeros alunos que passaram por meus cursos na pós-graduação do Observatório Nacional, cuja curiosidade e interesse tem me levado a tentar melhor compreender as reais diferenças e similaridades dos corpos de nossa vizinhança cósmica.

---

## Sobre a autora

Daniela Lazzaro ([lazzaro@on.br](mailto:lazzaro@on.br)) é pesquisadora do Observatório Nacional (ON). É especialista no estudo de pequenos corpos do Sistema Solar com mais de 100 artigos publicados em revistas científicas. É membro da Academia Brasileira de Ciências e da Academia Latino-Americana de Ciência. Foi a idealizadora e coordenadora da implantação do Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica, instalado no sertão pernambucano e dedicado ao estudo de pequenos corpos do Sistema Solar.

## Referências

- [1] J. J. Lissauer e I. de Pater, *Fundamental Planetary Science: Physics, Chemistry and Habitability* (Cambridge University Press, 2019).
- [2] L. M. Lara e D. Jewitt, *Planetary Systems Now* (World Scientific, 2022).
- [3] D. Lazzaro, *O Sistema Solar e seus corpos extraordinários*, *Ciência Hoje* **43**, 40 (2009).