

## TRADUÇÕES/TRANSLATIONS

### A LUA E A ORIGEM DA VIDA

Tradução e adaptação realizada por **Marta Silvia M. Mantovani** (IAG/USP) do artigo de **Jacques Laskar** (Bureau des Longitudes, Paris, France), que foi publicado na *Pour La Science*, n.º. 186, página 34, de abril 1993, sob o título de "La Lune et L'origine de la vie", e em *Le Scienze*, n.º. 301, página 44, de setembro 1993, sob o título "La Luna e L'origine della vita."

**THE MOON AND THE ORIGIN OF LIFE** - *Translation and adaptation carried out by Marta Silvia M. Mantovani (IAG/USP) of the article by Jacques Laskar (Bureau des Longitudes, Paris, France), which was published in Pour la Science, n.º. 106, page 34, April 1993, under the title "La Lune et L'origine de la vie", and in Le Scienze, n.º. 301, page 44, September 1993, under the title "La Lune e L'origine della vita".*

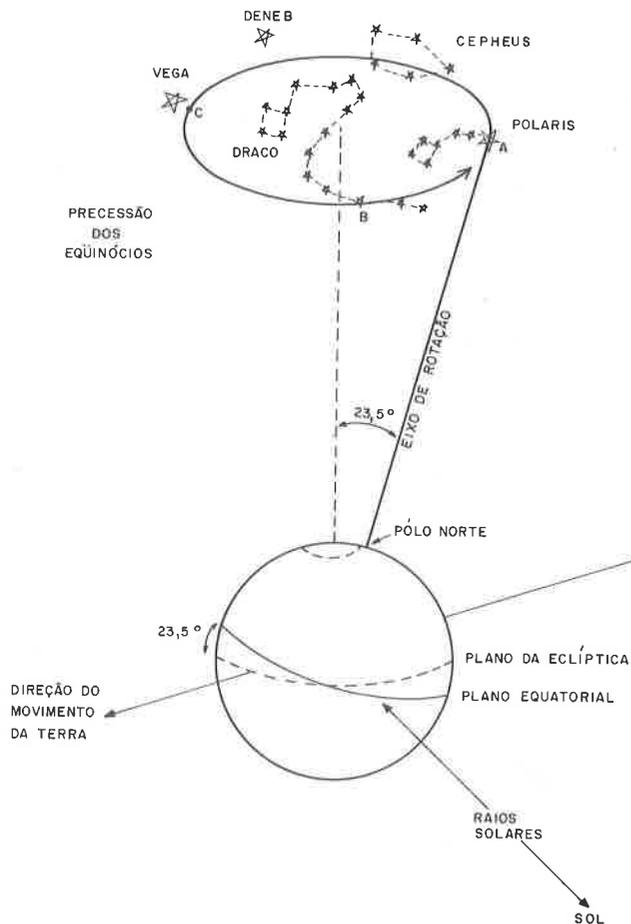
*Utilizando os movimentos orbitais dos planetas do sistema solar, é demonstrado que a Terra deve sua estabilidade climática à presença da Lua. A instabilidade orbital devido à ausência da Lua poderia provocar fortes variações climáticas incompatíveis com o aparecimento de vida organizada. Por conseguinte, a evolução da vida sobre a Terra está ligada a um evento único, que é de ocorrência muito improvável nos modelos de formação do sistema solar.*

### O CICLO DAS ESTAÇÕES

Estamos familiarizados com o ciclo das estações climáticas cuja alternância é devida ao fato de que o Equador da Terra forma um ângulo com relação ao plano da órbita terrestre ao redor do Sol (Eclíptica). Esta inclinação de  $23^{\circ}27'$  é também a causa da existência de regiões no interior dos círculos polares Ártico e Antártico, nos quais os dias e as noites duram aproximadamente 6 meses. A distribuição da quantidade de calor solar que alcança o solo depende da inclinação do eixo terrestre, que é portanto um dos elementos fundamentais para a compreensão do clima. Os cálculos que foram efetuados no *Bureau des Longitudes* de Paris indicam que a Lua estabiliza as possíveis oscilações da inclinação do eixo de rotação e, portanto, age como fator regulador do clima terrestre (Laskar et al., 1993).

No ano 120 aC Hiparco descobriu que a direção do eixo de rotação da Terra não é fixa mas na realidade descreve um cone no espaço com período de cerca de 26.000 anos (Fig. 1). Este movimento, denominado precessão dos equinócios, é devido a existência do bojo equatorial terrestre e à força que a Lua e o Sol exercem sobre este bojo (força de atração). Pode-se observar facilmente o fenômeno de precessão do eixo de rotação de um corpo sólido num campo gravitacional quando fazemos girar um pião sobre uma mesa. Uma das consequências do fenômeno é que o eixo de rotação da Terra nem sempre aponta na direção da Estrela Polar, mas descreve um círculo amplo na sua volta celeste.

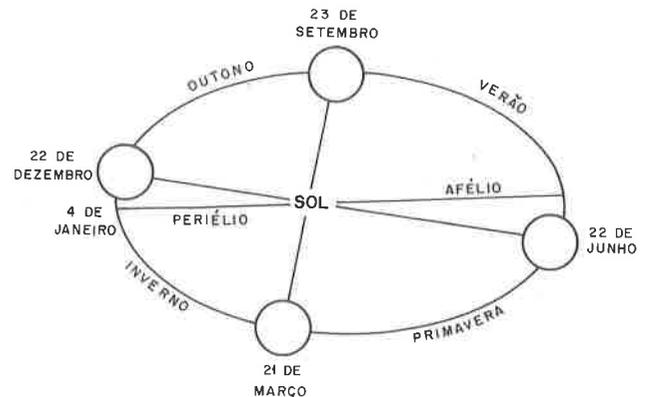
A precessão dos equinócios, entre outras coisas, é uma grande fonte de dificuldades para quem se interessa por astrologia, porque introduz um desvio entre o calendário e o movimento aparente do Sol o qual, no período corres-



**Figura 1** - A Terra não é perfeitamente esférica, mas um pouco achatada nos polos, e com um bojo no Equador. Pelo efeito da atração da gravidade da Lua e do Sol, o eixo de rotação terrestre descreve um cone como aquele de um pião; a direção do eixo aponta para a estrela polar (ponto A), porém, com o decorrer do tempo, traça um amplo círculo ao redor da volta celeste em 26.000 anos aproximadamente. Este é o fenômeno das precessões dos equinócios. Cerca de 5.000 anos atrás a direção do Pólo Norte era dada pela estrela Alfa do Dragão (ponto B); daqui a 13.000 anos será indicada por Vega (ponto C), conforme pode ser visto no diagrama das constelações do hemisfério boreal.

pondente ao signo de Áries, se encontra hoje na constelação de Peixes.

O movimento de precessão influencia o clima da Terra. Como Kepler demonstrou em 1609, observa-se que a órbita terrestre não é circular, mas aproximadamente elíptica, sendo que o Sol ocupa um dos focos da elipse



**Figura 2** - Órbita da Terra ao redor do Sol, mostrando as estações para o hemisfério norte (elipsidade exagerada). A alternância das estações depende inicialmente de dois fatores: a inclinação ( $23,5^\circ$ ) do eixo de rotação da Terra com relação ao plano da órbita (Eclíptica), e a precessão dos equinócios. Com a presente posição do eixo de rotação, este direciona-se a favor do Sol durante o verão boreal, e ao contrário durante o inverno. Conforme o valor assumido para o ângulo de precessão, a Terra pode encontrar-se no ponto de sua órbita mais próxima ao Sol (periélio) durante o verão boreal ou, como no caso atual, durante o inverno; cada uma dessas condições resulta em um aumento ou um decréscimo dos contrastes sazonais.

(Fig. 2). A excentricidade da elipse - sua medida de alongamento - é pequena (0,017), mas suficiente para fazer variar a quantidade de calor que chega ao solo entre o periélio, isto é, o ponto da órbita na qual a Terra se encontra mais próxima ao Sol, e o afélio, onde a distância é máxima.

Atualmente a passagem pelo periélio acontece no dia 4 de janeiro, durante o inverno boreal (hemisfério norte) e verão austral (hemisfério sul); o resultado é uma redução dos contrastes sazonais no hemisfério boreal e uma acentuação com relação ao austral. Daqui a 13.000 anos o efeito será oposto e a diferença entre as estações será maior no hemisfério boreal. A precessão dos equinócios modifica, portanto, o andamento da insolação num dado local da Terra, no curso do ano. Na realidade, as mudanças climáticas mais relevantes parecem ser produzidas por variações da excentricidade da órbita e da inclinação do eixo terrestre.

## A TEORIA ASTRONÔMICA E OS PALEOCLIMAS

De acordo com Kepler, a Terra descreve uma elipse imutável. Newton revolucionou essa interpretação demonstrando que as massas dos outros planetas do sistema solar perturbam a órbita terrestre, que é portanto elíptica somente em uma primeira aproximação: nem sua excentricidade, nem a inclinação do eixo são fixos. Urbain-Jean-Joseph LeVerrier, célebre por ter descoberto em 1846 o planeta Netuno (graças ao cálculo das perturbações na órbita de Urano), foi o primeiro que calculou as variações de período muito longo, denominadas variações seculares, da excentricidade da órbita terrestre, reportando-se a trabalhos executados por LaPlace, pouco antes da Revolução Francesa. Graças às soluções de LeVerrier para os movimentos orbitais da Terra, o astrônomo croata Milutin Milankovic, em 1941, apresentou a hipótese pela qual as grandes glaciações ocorridas no Quaternário teriam sido o resultado de variações da insolação nas altas latitudes, induzidas pelas variações seculares da órbita e da orientação da Terra. Essa teoria não foi aceita imediatamente, uma vez que as variações de insolação não pareciam suficientes para gerar mudanças de temperatura capazes de provocar uma glaciação.

A teoria, entretanto, encontrou grandes confirmações nos últimos vinte anos. As medidas isotópicas da razão entre o oxigênio 18 e o oxigênio 16, obtidas por John Imbrie e colaboradores, constituem indicadores da espessura das calotas polares, as quais permitiram obter estimativas das temperaturas médias dos mares em épocas passadas (Imbrie, 1982).

Atualmente, essas medidas são efetuadas através da análise dos carbonatos presentes em testemunhos de sedimentos marinhos, e permitem reconstruir os climas do passado por um período de cerca de 3 milhões de anos. Existem também outros testemunhos geológicos bem menos precisos, mas que permitem recuar até cerca de 200 milhões de anos. De outro lado, modelos mais perfeitos da resposta climática às variações da órbita terrestre mostram que o efeito de variação na insolação pode ser amplificado por efeitos secundários devido à extensão das calotas polares ou às mudanças na composição atmosférica.

Um dos elementos essenciais no estudo da variação da insolação é o cálculo da variação da inclinação do eixo terrestre devido ao efeito de perturbações exercidas pelos outros planetas. No intervalo de 1 milhão de anos essa variação é de apenas  $\pm 1,3^\circ$  com relação ao valor médio de

$23,3^\circ$ ; porém, não se trata de uma quantia desprezível, uma vez que provoca variações de quase 20% da insolação no verão a  $65^\circ$  de latitude norte. A quantidade de calor em excesso recebida durante o verão pelas zonas de alta latitude é um dado importante para o estudo dos climas, uma vez que é exatamente esse calor que causa a fusão das geleiras acumuladas durante o inverno e impede o aumento, além de um certo limite, da superfície ocupada pelas calotas polares.

A pequena variação na inclinação do eixo terrestre é determinante para assegurar a relativa regularidade climática na qual nosso planeta é beneficiado há milhões de anos, e que permitiu a evolução da vida organizada assim como nós a conhecemos. Embora as glaciações tenham representado mudanças climáticas relevantes, essas não foram suficientes para alterar, de forma permanente ou duradoura, as condições de vida na superfície terrestre.

## AS VARIAÇÕES DE INCLINAÇÃO DO EIXO TERRESTRE

As perturbações exercidas pelos outros planetas fazem girar no espaço a órbita da Terra com um movimento que pode ser representado aproximadamente como sendo a resultante de várias rotações uniformes de período compreendido entre 40.000 e vários milhões de anos, cada uma devida principalmente à influência de um dos outros planetas. O efeito deste movimento complexo sobre o nosso pião terrestre é o que induz as pequenas oscilações na inclinação de seu eixo. Se o período de excitação produzida por esse movimento da órbita da Terra estiver próximo ao período de precessão do eixo, manifesta-se um fenômeno físico clássico denominado ressonância. Por exemplo: temos uma ressonância quando empurramos um balanço no momento exato em que esse chega no seu ponto máximo de sua trajetória. Mesmo que o empurrão ou impulso aplicado seja muito fraco, as oscilações do balanço se amplificarão (especialmente se não houver atrito); e vice-versa, se o empurrão for aplicado em um ponto qualquer da trajetória, não acontecerá nada de particular.

Ao invés de utilizar os períodos vamos considerar a velocidade de rotação dos diferentes componentes do movimento. Sendo que todos os movimentos de precessão que citaremos são muito lentos, a unidade empregada será o segundo de arco por ano ou, por questões de brevidade, segundo por ano. Uma velocidade de rotação de um segundo por ano corresponde, então, a um período de 360 vezes

3.600, que é igual a 1.296.000 anos. Vou permitir-me uma pequena liberdade de linguagem denominando frequências essas velocidades angulares de rotação.

Expressa nesses termos, a frequência de precessão da Terra será de 50,47 segundos por ano, enquanto que as frequências principais do movimento da órbita variam entre 26,33 segundos por ano até a não mais que 0,67 segundos por ano; as mais importantes são aquelas de 18,85 e 17,75 segundos por ano. Estamos, portanto, afastados das ressonâncias, o que explica a pequena quantidade de variação na inclinação do eixo terrestre. Não é este o caso de Marte, cuja frequência de precessão é de 7,5 segundos/ano com inclinação atual do eixo de 25,2°; William Ward, do *Jet Propulsion Laboratory*, fez notar que o eixo de rotação de Marte mostra enormes variações na inclinação ( $\pm 10^\circ$ ) por causa de sua aproximação com as ressonâncias seculares orbitais (Ward, 1982).

### E SE ELIMINÁSSEMOS A LUA?

Não estou propondo realmente fazê-lo, mas apenas compreender, através de simulações numéricas por computador, a importância da ação da Lua na dinâmica da Terra. Com efeito, a atração da gravidade que é exercida sobre o bojo equatorial terrestre é devida 2/3 à Lua e cerca de 1/3 ao Sol. Se não existisse a Lua a frequência de precessão da Terra passaria de 50,47 seg/anos a cerca de 15,6 seg/ano e, portanto, se aproximaria às frequências orbitais da Terra com a possibilidade de que se manifeste ressonância.

Em 1982, Ward estudou este problema com um modelo simplificado e concluiu que a eliminação da Lua provocaria variações na inclinação do eixo terrestre da mesma ordem daquelas de Marte. Entretanto, na ausência da Lua, a Terra teria uma velocidade de rotação mais elevada e seu bojo equatorial seria bastante maior. Segundo Ward (1982), a maior quantidade da atração solar compensaria, em boa parte, a ausência da ação da Lua, tanto que as variações de inclinação do eixo resultariam análogas às que-las observadas.

No *Bureau des Longitudes* enfrentamos esse problema utilizando um modelo mais exato do movimento da Terra. Dispúnhamos já da solução dos movimentos orbitais da Terra e dos outros planetas, que precedentemente eu havia calculado como sendo 400 milhões de anos; essa solução me permitiu demonstrar, em 1989, que os movimentos orbitais dos planetas internos ao sistema solar (Mercúrio, Vênus, Terra e Marte) são caóticos (Laskar, 1989). Era,

portanto, possível estudar numericamente, para períodos muito longos, as mudanças da orientação da Terra devidas às suas variações orbitais.

Inicialmente, simulamos em nosso modelo um desaparecimento improvável da Lua e observamos o que aconteceria ao eixo terrestre durante 1 milhão de anos, num período relativamente breve, se esses possíveis efeitos derivados da natureza caótica do movimento orbital fossem já relevantes. As variações na inclinação do eixo resultaram da ordem de  $\pm 15^\circ$ , acompanhados de variações na insolação, a  $65^\circ$  de latitude norte, consideravelmente maiores do que quanto havíamos obtido anteriormente. Se no passado as variações de insolação a essas altas latitudes foram, exatamente como o que postula a teoria de Milankovic, responsáveis pelos episódios glaciais, é muito provável que as alterações dessa grandeza possam provocar mudanças de temperatura ainda mais extremas. O nosso intuito, entretanto, não é aquele de eliminar a Lua, mas de compreender qual teria sido a evolução da Terra se seu satélite nunca tivesse existido; portanto, colocamos o problema de como tenha nascido a Lua.

### A ORIGEM DA LUA

A Lua constitui um enigma para os astrônomos: sua massa, cerca de 1/81 daquela terrestre, é muito grande para um satélite e a coloca numa posição única no sistema solar. Somente Júpiter, Saturno, e Netuno possuem satélites de massa comparável, mas uma massa, respectivamente, de 318, 95, e 17 vezes superiores àquela da Terra. A formação da Lua, portanto, coloca um problema particular e, para explicá-la, foram formuladas diversas hipóteses.

De acordo com a teoria da fissão, a Terra, como resultado de uma rotação muito rápida (de 2 a 3 horas), teria perdido uma parte de seu próprio manto por efeito da força centrífuga. Esse modelo, entretanto, tem sido abandonado porque é difícil explicar uma rotação inicial tão rápida da Terra, a notável diferença de composição química da Terra e da Lua, e ainda mais o fato que a órbita da Lua não esteja no plano equatorial terrestre, mas seja inclinada de  $5^\circ$  com relação a este.

A Lua poderia ter se formado contemporaneamente com a Terra, por acúmulo de matéria orbitante ao redor desta. Essa hipótese explica o fato de que a Lua orbita próxima do plano da eclíptica, mas não explica a sensível diferença de composição química entre os dois corpos celestes.

De acordo com a teoria da captura, a Lua, formada numa região próxima do espaço, teria sido capturada pelo campo gravitacional da Terra. Atualmente são aventados dois modos de captura, um "suave" e outro "violento"; neste último, um corpo de grande massa teria se chocado com a Terra produzindo uma quantidade de detritos que, subsequentemente, se agregaram para formar a Lua.

O problema colocado por essas teorias - a segunda das quais atualmente é a mais aceita - é a probabilidade bastante baixa de que possa acontecer um tal evento. O que não satisfaz é o fato que o princípio de "mediocridade" requer que os eventos observados sejam eventos ordinários, e não excepcionais.

Se a origem da Lua permanece um enigma, objeto de especulações mais disparatadas, é entretanto possível reconstruir sua história até uma época bastante remota.

## A AÇÃO DA LUA

A Lua exerce sobre a Terra uma força de atração que podemos observar continuamente através dos seus efeitos, como por exemplo o fenômeno das marés. Uma vez que o período de rotação da Terra (um dia) é mais breve do que o de revolução da Lua ao redor da Terra (28 dias), as marés se deslocam sobre a superfície terrestre, e esse deslocamento é acompanhado por uma dissipação de energia.

O que resulta disso é um atraso na rotação terrestre com uma diminuição de velocidade na rotação terrestre (e portanto um alongamento do dia de cerca de 0,002 seg/século) e um afastamento da Lua de cerca de 3,5cm/ano. Milhões de anos atrás, portanto, a Terra girava mais rapidamente sobre si mesma e a Lua estava mais próxima.

O atraso de rotação não é uniforme, como pode-se constatar analisando os diferentes indicadores que variam seguindo os ciclos das marés oceânicas, como por exemplo o crescimento dos corais e de certas conchas fósseis. Entretanto, graças ao estudo de depósitos sedimentares, o geólogo australiano George Williams conseguiu voltar no tempo mais remoto descobrindo que há 2,5 milhões de anos a duração do dia era de 20 horas e que a Lua se encontrava a 348.000 km de distância da Terra (atualmente sua distância é de 384.000 km) (Williams, 1990).

Para obter estes resultados ele analisou sedimentos superpostos, depositados alternadamente num estuário de um rio (camadas de barro escuro) e do mar (camadas de areia clara), segundo o ritmo das marés. O ciclo anual dessas últimas permite calcular os valores citados supondo,

como parece ser razoável, que a duração do ano não tenha variado sensivelmente desde então. Portanto naquela época a Lua já existia. Outros testemunhos geológicos mais fracos nos fazem pensar que nosso satélite estivesse presente em tempos ainda mais remotos, cerca de 3,8 milhões de anos atrás. Se a Lua tiver sido realmente capturada, isso deve ter ocorrido num momento muito precoce da história do sistema solar.

## A TERRA SEM A LUA

Na ausência da Lua, a velocidade de rotação da Terra seria, como vimos, muito mais elevada porque não teria havido redução devido as marés. Extrapolando os valores encontrados por Williams, pode-se estimar que a velocidade de rotação primordial seria da ordem de 1,6 vezes aquela atual, uma vez que a duração do dia deveria ser de cerca de 15 horas. Em colaboração com Frédéric Joutel e Phillippe Robutel, estudamos, em função desta hipótese, as possíveis variações da inclinação do eixo terrestre, utilizando para essa finalidade um novo método de análise da estabilidade do movimento: a análise da frequência. Para cada valor da inclinação inicial obtém-se uma velocidade de precessão do eixo de rotação. Se o movimento for estável, a velocidade de precessão variará com continuidade quando se modifica a inclinação inicial. Vice-versa, se o movimento for caótico ou instável, a velocidade de precessão não será mais definida de forma unívoca, mas dependerá fortemente de diferenças, mesmo se minúsculas, nas condições iniciais. Colocando num gráfico a velocidade de precessão em função da inclinação inicial pode-se então determinar a estabilidade da inclinação do eixo. Esta análise demonstra que existe uma grande zona caótica que varia desde 0° até cerca de 85°: se, para qualquer uma inclinação inicial do eixo compreendido entre esses dois valores, a Lua não estivesse presente, a inclinação do eixo terrestre poderia sofrer oscilações muito fortes e percorrer quase toda a zona em alguns milhões de anos (Laskar et al., 1993).

Na ilustração citada são representados valores mínimos, médios e máximos alcançados pela inclinação do eixo em 18 milhões de anos, para os diferentes valores da inclinação inicial. Num período tão breve a inclinação do eixo não percorre, para os exemplos considerados, toda a zona caótica, mas nossa análise demonstra que, para intervalos mais longos, ainda são possíveis variações que cobrem toda a zona.

Na ausência da Lua, a Terra mostraria, portanto, variações de orientação tais que o clima em sua superfície seria radicalmente modificado. É necessário destacar que, com uma inclinação do eixo de  $85^\circ$ , nosso planeta estaria “deitado” em sua órbita, da mesma forma como Urano. Grande parte da superfície terrestre estaria então sujeita a dias e noites de cerca de 6 meses, como atualmente ocorre para as regiões polares. Nos pólos o Sol estaria muito próximo do zênite e por longo tempo e, com toda a probabilidade, condições semelhantes de insolação originariam modificações relevantes na atmosfera terrestre. Obviamente, ao se supor um período de rotação primordial da Terra equivalente a 15 horas, escolhemos o que nos parecia mais sensato, mas outros cenários de formação da Lua poderiam conduzir a diferentes velocidades de rotação terrestre. Sendo que tudo isto é totalmente hipotético, preferimos estudar também a estabilidade da inclinação do eixo e a ausência da Lua para todos os valores presumíveis da velocidade de rotação primordial da Terra. Observa-se então que, para qualquer período de rotação compreendido entre 12 e 48 horas, existe uma zona caótica muito ampla para a inclinação do eixo, que vai desde  $0^\circ$  até cerca de  $85^\circ$ . É, portanto, legítimo afirmar que a Lua age como regulador climático da Terra, assegurando-lhe uma relativa estabilidade climática de longo tempo.

Podemos nos perguntar agora qual seria a situação para os outros planetas do sistema solar.

## O COMPORTAMENTO CAÓTICO DA ORIENTAÇÃO DOS PLANETAS

Através do mesmo método utilizado para a Terra, estudamos a estabilidade de orientação de todos os planetas principais do sistema solar (Laskar & Robutel, 1993). Mercúrio e Vênus são casos particulares porque, sem dúvida devido aos efeitos de maré produzidos pelo Sol, suas velocidades de rotação atuais são muito baixas. Vênus possui também uma particularidade interessante, e que há muito tempo tem estimulado os astrônomos: sua rotação é retrógrada, ou seja, acontece em sentido oposto àquela dos demais planetas como se o eixo tivesse sido invertido.

Até agora a maior parte dos astrônomos que se dedicaram a este problema concluiu que Vênus nasceu desta forma ou, na pior das hipóteses, deitada, porque mesmo nesse caso os efeitos dissipativos devidos às interações

núcleo-manto ou às forças de marés exercidas sobre a atmosfera Venusiana, devido ao Sol, poderiam ter invertido seu eixo.

Nós demonstramos, vice-versa, que se Vênus também tivesse tido inicialmente uma velocidade com sentido de rotação semelhante àquela da Terra, a presença de uma zona caótica tão ampla teria feito com que a inclinação do eixo pudesse alcançar valores muito elevados, próximos a  $90^\circ$ . Os efeitos dissipativos poderiam então levar o planeta à sua situação atual, onde teria se estabilizado.

Para Mercúrio a situação é um pouco diferente. Como no caso de Vênus não conhecemos o período de rotação primordial de Mercúrio, mas é suficiente supor que fosse inferior a 300 horas para garantir que, no curso de sua história, Mercúrio tenha conhecido um episódio fortemente caótico, com variações de inclinação do eixo de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , em poucos milhões de anos. Em seguida, conforme se atravava ou diminuía sua velocidade por causa dos efeitos de maré devido ao Sol, o planeta pôde novamente se endireitar culminando com sua situação atual.

Marte está afastado do Sol e seus satélites, Phobos e Deimos, tem massas muito pequenas para atrasar a sua rotação; seu período de rotação atual de 240h e 37', deve ser, portanto, muito próximo àquela primordial. O equador de Marte é inclinado de  $25^\circ$  com respeito ao plano da órbita, e a velocidade de precessão do planeta, de 7,26 seg/ano, é próxima a certas frequências do movimento orbital. Além do mais as variações na inclinação da órbita de Marte são bem mais relevantes do que aquelas da Terra. Conseqüentemente, também as oscilações da inclinação do eixo no período de 1 milhão de anos são muito maiores do que aquelas da Terra: como já foi dito, segundo Ward, seriam da ordem de  $\pm 10^\circ$  com relação ao valor médio de  $25^\circ$ . Essas variações induziriam fortes alterações no clima de Marte, e certas estruturas observadas sob sua superfície parecem testemunhar esses traumas antigos.

Os cálculos que efetuamos recentemente demonstram que as oscilações do eixo de Marte são caóticas. Este fato tem duas conseqüências. Em primeiro lugar, assim como acontece para os movimentos orbitais dos planetas internos, não é possível formular previsões sobre o movimento de precessão do eixo de Marte que ultrapassem alguns milhões de anos.

Ainda mais importante, é que a inclinação do eixo de Marte pode sofrer variações muito maiores do que aquelas calculadas por Ward, variações que podem passar de  $0^\circ$  a

60° em alguns milhões de anos. Os climas do passado em Marte devem portanto ser reconsiderados em vista desses novos dados. A existência de uma ampla zona caótica para a orientação de Marte tem uma outra consequência: a inclinação do eixo deste planeta não pode ser considerada primordial, o que faz cair um vínculo sobre os modelos que descrevem a origem do sistema solar.

## A HIPÓTESE DA FORMAÇÃO DO SISTEMA SOLAR

A partir dos trabalhos de V.S. Safronov em 1960 (Safronov, 1969), todos os modelos da formação do sistema solar postulam a existência de uma nebulosa solar primordial altamente maciça. Por instabilidade gravitacional, uma parte dessa nebulosa colapsou e formou o Sol, enquanto que o resto se agregou em pequenos corpos, os planetóides. Os planetas se formaram em seguida, a partir dos planetóides maiores, que englobaram outros planetóides no curso de colisões; os planetóides que não foram incorporados foram finalmente expulsos do sistema solar.

Safronov demonstrou que, se o processo tivesse se desenvolvido a partir de muitos planetas de pequenas dimensões, a rotação de todos os planetas resultantes teria tido um mesmo sentido, e a inclinação de seus eixos teria sido aproximadamente nula. Para explicar as notáveis variações de orientação observadas, Safronov teve que introduzir uma componente denominada estocástica, num mecanismo de agregação dos planetas, consistente numa fase final de colisões entre planetesimais ou planetóides maiores.

O resultado que obtivemos recentemente demonstra que, na realidade, as orientações dos planetas internos (Mercúrio, Vênus, Terra e Marte) podem ter como causa única a ação de perturbações seculares planetárias, as quais se somam, para Mercúrio e Vênus, aos efeitos dissipativos das forças de maré devidas ao Sol.

Uma outra conclusão é que as orientações dos planetas externos, assim como os seus movimentos orbitais, são essencialmente estáveis. Portanto, não se pode atribuir a mesma causa à forte inclinação de Urano (98°); entretanto é sempre possível imaginar que, para esse planeta, existam cenários semelhantes àquele que nós propusemos para Vênus supondo, como Safronov, que o sistema solar primordial fosse extremamente maciço (Laskar & Robutel, 1993).

## POSSIBILIDADE DE VIDA EXTRATERRESTRE

No dia 12 de outubro de 1992 a NASA iniciou o projeto SETI (Search for Extra Terrestrial Intelligence), um programa de busca de sinais produzidos por eventuais civilizações extraterrestres evoluídas. Este programa consiste em buscar nos próximos 10 anos, através de radio-telescópios e em todos os intervalos de frequência possíveis, sinais de rádio de origem extraterrestre. Dada a amplitude da órbita celeste, cerca de 800 estrelas do tipo solar situadas a menos de 80 anos luz da Terra, foram selecionadas para uma "escuta" mais atenta que dedicará cerca de 20 horas a cada uma, um mínimo indispensável para se ter uma possibilidade de observar alguma coisa, a menos que a emissão proveniente de um eventual sistema extra-solar não seja particularmente intensa.

Uma hipótese fundamental existe na base de um tal projeto: a situação da Terra na órbita em torno do Sol não deve ser um fato extraordinário, mas deve entretanto ter se repetido mais vezes em formas múltiplas, no interior de nossa galáxia. Entretanto não temos a capacidade de avaliar quantitativamente a probabilidade do aparecimento de vida organizada semelhante àquela terrestre, num planeta que orbite em torno de outra estrela.

Mesmo sem falar sobre o aparecimento da vida, nas condições que podem conduzir ao desenvolvimento de uma civilização susceptível de se comunicar conosco através de emissões de rádio, até agora não temos qualquer idéia de qual seja a probabilidade de que uma estrela do tipo Solar possua um sistema planetário como aquele ao qual nós pertencemos. A despeito dos freqüentes anúncios de descoberta de planetas extra-solares, ainda não se identificou com certeza qualquer objeto deste tipo, e somente as observações de discos (talvez) proto-planetários do tipo Beta Pictoris parecem convincentes.

Quase todas as estimativas de probabilidade de vida extraterrestre parecem concordar num ponto: num dado sistema planetário, somente um planeta que se encontre nem muito próximo nem muito afastado do Sol pode permitir o desenvolvimento de uma vida organizada como a que conhecemos sobre a Terra. Com efeito, algumas simulações executadas em 78 por Michael Hart indicam que, externamente a uma estreita "zona de habitabilidade", poderia se verificar ou um efeito estufa tipo avalanche tal a gerar uma situação semelhante àquela que se observa em Vênus, ou o desaparecimento quase total da atmosfera, como se observou em Marte.

Nossos cálculos demonstram que as coisas não são assim, e que a evolução da vida sobre a Terra está sem dúvida ligada a um evento que é muito pouco provável de ocorrer nos modelos de formação do sistema solar: o fato de que um dos planetas situados na zona de habitabilidade consiga estabilizar, de forma adequada, as variações de insolação de longo termo, graças a um satélite de grande massa como seja a Lua. Obviamente poderiam se verificar outras situações particulares tais a garantir uma estabilidade climática no planeta em questão, mas é importante notar que, sem dúvida, essa situação não é comum. A probabilidade de que num sistema planetário exista um planeta caracterizado por uma instabilidade climática comparável àquela terrestre deve ser certamente reduzida de várias ordens de grandeza, assim como deve ser fortemente redimensionada a possibilidade de sucesso de um projeto como aquele da NASA.

## QUESTÕES EM ABERTO

Utilizando os movimentos orbitais dos planetas do sistema solar, demonstramos que a Terra deve, sem dúvida, sua própria estabilidade climática à presença da Lua. É necessário destacar que, se nossa existência está estritamente ligada àquela de nosso satélite, é possível também aceitar, para a formação da Lua, um cenário pouco provável, que deveria ser recusado se admitíssemos, como hipótese de partida, o fato de nos encontrarmos numa situação não excepcional. Os modelos de formação da Lua devem, portanto, ser reexaminados neste ângulo.

De outro lado, o movimento orbital do planeta é intrinsecamente caótico. Não parece que para a Terra isso tenha qualquer efeito considerável em seus parâmetros orbitais, mas num outro sistema planetário as coisas poderiam seguir de outra forma, totalmente diferente, e a instabilidade orbital poderia provocar fortes variações climáticas, incompatíveis com o aparecimento de vida organizada, ou mesmo causar a expulsão da zona de habitabilidade do único planeta que lá se encontrava inicialmente. Somente um conhecimento mais aprofundado da dinâmica global do sistema planetário permitirá responder, pelo menos em parte, essas questões.

Ainda estamos muito afastados do conhecimento dos mecanismos de formação dos sistemas planetários. Uma das maiores dificuldades na resolução deste problema está no fato de que dispomos de um único exemplo do sistema planetário, isto é, o nosso. Descobrir um outro, mesmo sem qualquer forma de vida, constituiria um passo fundamental para compreender de que forma tem evoluído o nosso sistema solar.

Finalmente, a resposta climática induzida na superfície de um planeta devido às mudanças relevantes da órbita, ou da orientação do eixo de rotação, ainda é pouco conhecida, e é possível prever que os futuros progressos do conhecimento da dinâmica das atmosferas planetárias permitam simular efeitos dessas mudanças mediante modelos no computador.

Todos esses problemas que estão relacionados com setores muito diferentes da ciência astronômica constituem em seu conjunto um vasto programa de pesquisa. Se nos dedicarmos com o necessário empenho para resolvê-los, poderemos, sem dúvida, obter elementos importantes para compreender a origem dos sistemas solares e as condições que permitiram o aparecimento da vida em nosso planeta.

## REFERÊNCIAS

- IMBRIE, J. - 1982** - Astronomical theory of the Pleistocene Ice Ages: a brief historical review. *Icarus*, **50**:408-422.
- LASKAR, J. - 1989** - A numerical experiment on the chaotic behavior of the Solar System. *Nature*, **388**:237-238.
- LASKAR, J. & ROBUTEL, P. - 1993** - The chaotic obliquity of the planets. *Nature*, **361**:608-612.
- LASKAR, J., JOUTEL, F. & ROBUTEL, P. - 1993** - Stabilization of the Earth's obliquity by the Moon. *Nature*, **361**:615-617.
- SAFRONOV, V. S. - 1969** - Evolution of the Protoplanetary cloud and formation of the Earth and the planets. Nauka, Moscou.
- WARD, W. R. - 1982** - Comments on the long-term stability of the Earth's obliquity. *Icarus*, **50**:444-448.
- WILLIAMS, G. E. - 1990** - *J. Phys. Earth*, **38**:475-491.