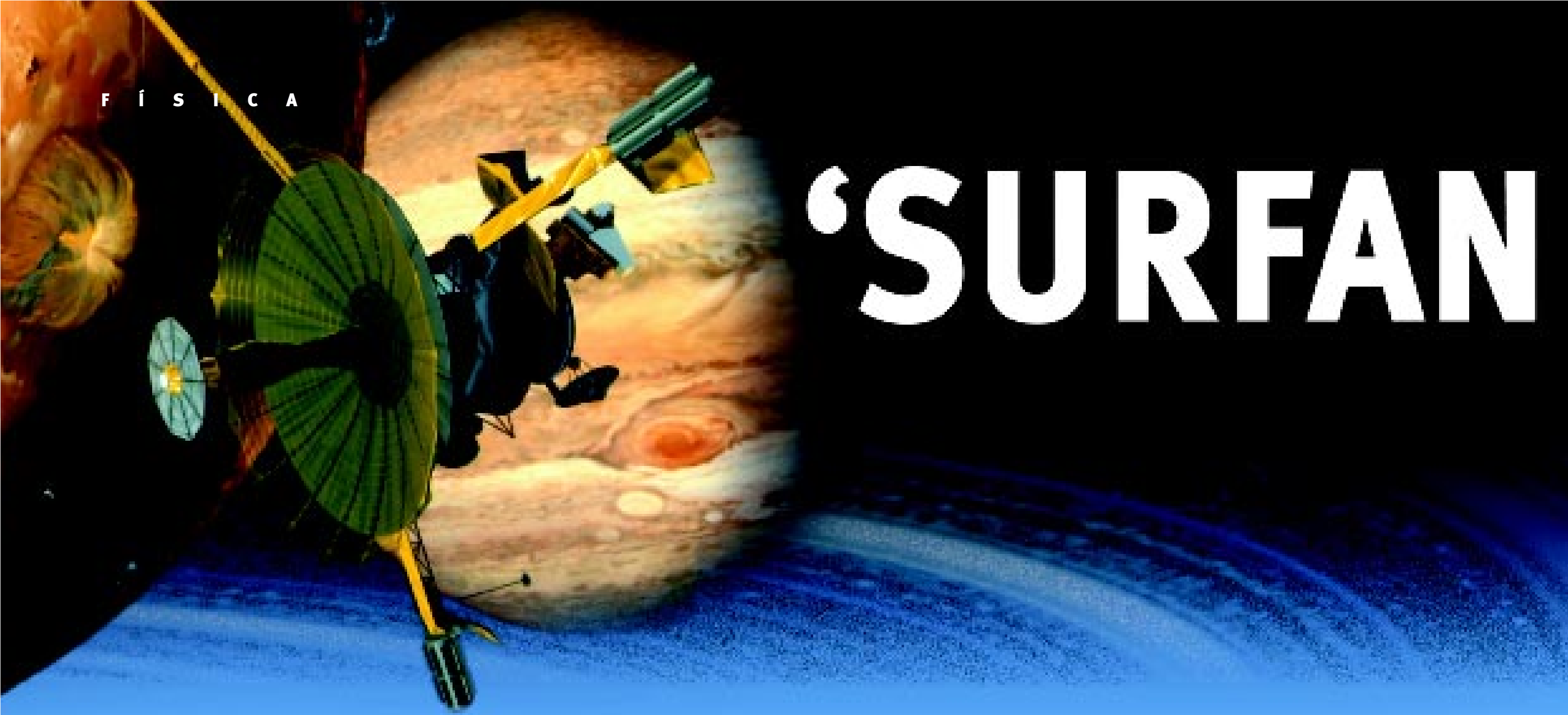
F Í S I C A



‘SURFAN

Um veículo lançador falha. E uma sonda que deveria orbitar a Lua acaba presa à gravidade terrestre. Fim da missão? Não. Graças ao caos, ela vai chegar sã e salva ao seu destino original. Melhor: com um gasto mínimo de combustível, pois irá até lá ‘surfando’ em uma trajetória caótica. Certamente, uma cena de ficção. Não, realidade pura. A técnica, baseada no chamado controle do caos, ganhou base experimental sólida depois de testada com sucesso no resgate e na reorientação de sondas e satélites.

Elbert E. N. Macau
Laboratório Associado de Computação e Matemática Aplicada, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Celso Grebogi
Instituto de Física, Universidade de São Paulo

20 de julho de 1969. Um dos maiores épicos de todos os tempos se desenrola, e todos podem acompanhar ao vivo, graças à então novíssima tecnologia de comunicação ‘via satélite’. E, com grande emoção, às 23h56 (hora de Brasília), cerca de 1,2 bilhão de pessoas testemunham o momento em que o homem – no caso, o astronauta norte-americano Neil Armstrong – pisa pela primeira vez no solo lunar. A barreira mítica da chamada conquista da Lua havia finalmente caído, e as portas para a exploração espacial se abriam definitivamente.

A chegada do homem à Lua resultou de um intenso e concentrado trabalho de pesquisa e desenvolvimento tecnológico, envolvendo diversas áreas do conhecimento. Vejamos o caso da viagem em si. O item primordial era o transporte com segurança de vidas humanas. A viagem precisava ser a mais rápida e segura possível. Os gastos com combustível deveriam ser mínimos para limitar o tamanho e a potência do veículo lançador (figura 1A). A trajetória foi concebida para, em caso de pane, permitir o resgate da tripulação de forma simples e direta.

Missão Apollo

Para cumprir essas metas, os vôos da missão Apollo se subdividiam em fases. Na primeira, os três estágios do foguete Saturno V colocavam a espaçonave propriamente dita – constituída pelos módulos de serviço e de comando (figura 1B) – a 160 km da Terra. Após 2h30, novo impulso do terceiro estágio enviava a espaçonave em direção à Lua, em uma trajetória denominada translunar. Depois de 70 horas, alcançava-se o alvo.

Quando a espaçonave se encontrava pela primeira vez do lado ‘oculto’ da Lua, os motores eram novamente acionados e propiciavam o impulso que a colocava em uma órbita elíptica em torno desse satélite. Mais um impulso tornava a órbita circular, com um raio de

DO' NO CAOS

100 km. Seguiam-se as operações do módulo lunar, ou seja, do módulo da missão Apolo XI, que conduzia os astronautas até a superfície de nosso satélite e, de lá, de volta ao módulo de comando, que os esperava em órbita.

As missões Apollo empregavam a chamada trajetória de livre retorno, isto é, a energia da trajetória translunar era escolhida de forma que a nave não escapasse do sistema Terra-Lua em caso de falha em seu motor. Porém, se isso ocorresse, o veículo com os astronautas retornaria com segurança à Terra em poucos dias.

Todas essas manobras empregavam o princípio da transferência direta e impulsiva, ou seja, manobras realizadas pelo acionamento dos motores por curtos intervalos de tempo. Essa estratégia requer valores elevados de variação de velocidade, o que significa uma relação elevada entre dois fatores: a) massa de propelente; b) massa total da espaçonave. Isso, por sua vez, reduz a quantidade de carga útil que se poderia transportar – esta última limitada pelas características físicas do foguete.

O problema dos dois corpos

As manobras orbitais utilizadas para conduzir as espaçonaves do projeto Apollo da Terra até à Lua exploram um cenário conhecido como 'o problema dos dois corpos'. Trata-se da transferência de um desses corpos – uma nave, por exemplo – que está em órbita circular em torno do segundo – podemos imaginar a Terra. Deve-se, então, levar a nave para outra órbita, também circular e no mesmo plano da primeira. A forma clássica de se fazer isso é através da utilização da chamada da transferência de Hohmann, em homenagem ao engenheiro alemão Walter Hohmann (1880-1945), que a concebeu.

Para efetuar a transferência, essa técnica emprega uma órbita elíptica que deve ser tangente às duas órbitas circulares, ou seja, àquela em que se está e àquela em que se quer chegar. Assim, estando a nave na primeira delas, aplica-se um impulso na direção do movimento. Graças a ele, o veículo entra em uma órbita de transferência elíptica. Espera-se que o veículo complete meia revolução nessa nova trajetória e atinja nela o ponto de maior afastamento (apoapisis) em relação ao corpo central. Nesse exato ponto, aplica-se um segundo impulso, que faz com que a nave entre na órbita circular desejada em volta do corpo central (figura 2A).

A estratégia de Hohmann aplicada uma única vez, no entanto, não permite manobrar a nave de modo a levá-la a orbitar um segundo corpo – a Lua, por exemplo. Para isso, subdivide-se o problema em duas partes. Na primeira, despreza-se o efeito gravitacional da Lua e se utiliza o método de Hohmann para se transferir a nave da órbita ini- ▸

Figura 1. Em A, lançamento da Apollo 11, em 16 de julho de 1969, a bordo do foguete Saturno V, o mais poderoso veículo lançador espacial já construído pela humanidade. Em B, configuração de lançamento do foguete Saturno V para uma missão Apollo à Lua. Observe que o foguete propriamente dito se constitui de três módulos: S-IC, S-II e S-IVB. A nave Apollo, constituída dos módulos de comando e serviço, se acopla ao Saturno V acima da estrutura de armazenamento do módulo lunar

NASA

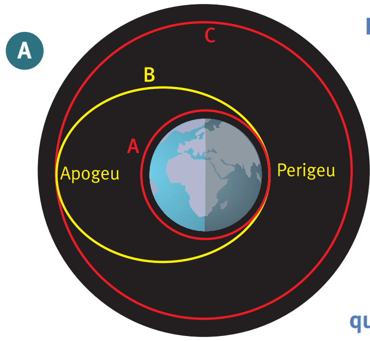
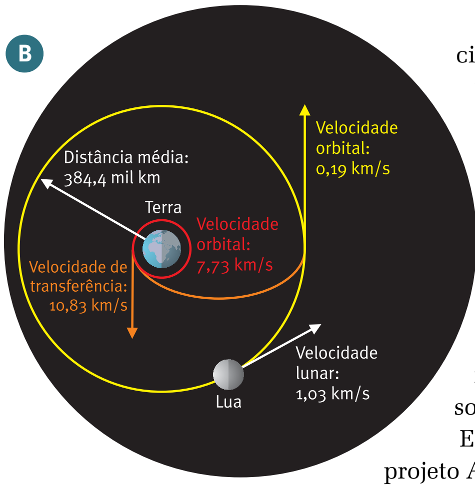


Figura 2. A transferência de Hohmann é a forma mais tradicional, direta, rápida e eficiente para se transferir uma nave entre duas órbitas circulares. Em A, estão delineadas as órbitas circulares (vermelho) entre as quais se quer transferir a nave, bem como a órbita de transferência (amarelo). Em B, estão as variações de velocidade necessárias para efetuar a transferência de uma órbita ao redor da Terra para outra que coincida com a da Lua



cial até uma que cruza a trajetória da Lua (figura 2B). Quando o veículo alcança um ponto da trajetória onde o campo gravitacional lunar passa a dominar o movimento – a chamada esfera de influência da Lua –, despreza-se, então, o efeito da Terra e considera-se o cenário da trajetória do veículo sob a ação da Lua.

Essa estratégia permitiu que o projeto Apollo levasse o homem à Lua (figura 3). Porém, envolve gastos elevados de combustível, compatíveis, no entanto, com as impressionantes características do foguete Saturno V.

Combustível insuficiente

Seria possível transferir a órbita de uma nave da Terra para a Lua utilizando-se menos combustível? Essa é uma questão importante, principalmente quando não se tem um veículo lançador com as características de um Saturno V. Infelizmente, em um cenário envolvendo uma transferência direta no âmbito do problema dos dois corpos, a estratégia de Hohmann é praticamente ótima. Assim, para reduzir os custos envolvidos, ou se consideram naves com a menor massa possível, ou se parte para um cenário que ofereça maior flexibilidade.

Essa segunda alternativa existe? Sim, quando se abandona o cenário do problema dos dois corpos e se considera o do chamado problema dos três corpos. Porém, vamos nos deter um pouco mais ao primeiro deles. Revendo a evolução da mecânica celeste, o físico e matemático inglês sir Isaac Newton (1642-1727) foi quem pela primeira vez obteve a solução em termos de funções elementares para as equações que descrevem o problema dos dois corpos: quando se tem um corpo se deslocando sob a ação gravitacional de outro – este central e de maior massa –, o primeiro descreve uma trajetória cônica, que pode vir a ser uma elipse, parábola ou hipérbole.

Nesse cenário, partindo-se das condições impostas pela posição e velocidade iniciais do corpo em órbita, chega-se a uma solução das equações que descrevem a trajetória percorrida. Na transferência de Hohmann, essas idéias são exploradas considerando-se dois cenários, um dado pela nave e a Terra e outro pela nave e a Lua.

Com um corpo a mais

Uma situação mais complexa, porém, é a de se obter a solução das equações que descrevem o problema dos três corpos. Esse é um cenário mais realístico, envolvendo, por exemplo, um veículo espacial que se move entre a Terra e a Lua. Aqui, sua trajetória sofre o tempo todo a influência gravitacional dos dois corpos maiores. Esse problema, que parece simples, não tem solução em termos de funções elementares. Assim, mesmo conhecendo a posição e a velocidade iniciais de nosso veículo, só podemos calcular sua órbita através do uso de ferramentas matemáticas sofisticadas – os chamados métodos numéricos – e com o auxílio de computadores.

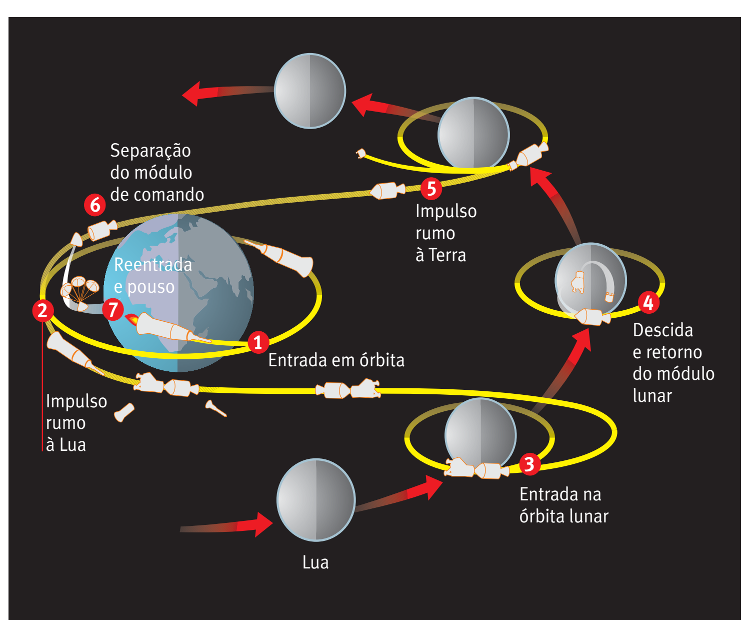


Figura 3. Etapas da jornada de ida à Lua e retorno à Terra utilizadas pelas missões Apollo

Porém, isso não é tudo. Desde o final do século 19, graças ao trabalho do matemático francês Henri Poincaré (1854-1912), sabe-se que, no âmbito do problema dos três corpos, podem ocorrer órbitas complexas e que não se repetem com o passar do tempo (aperiódicas). Porém, a característica mais importante delas é o fato de serem muito sensíveis a variações em suas condições iniciais – assunto que discutiremos adiante.

Essas órbitas – hoje denominadas caóticas – apresentam flexibilidade e sensibilidade incríveis, a ponto de proporcionar transferências entre pontos do espaço com quantidades mínimas de energia (combustível), conforme veremos a seguir.

O problema dos três corpos

Foi um longo caminho até que se entendesse o comportamento, bem como outros 'mistérios', dos sistemas caóticos. Esse caminho está intimamente ligado ao problema dos três corpos. Tão ou mais importante que chegar à lei da gravidade foi o fato de Newton associar a ela o caráter de universalidade, isso é, de ser aplicável às interações entre quaisquer dois ou mais objetos do universo.

Newton concebeu sua teoria da gravitação para explicar o movimento da Lua. Esse satélite interage com a Terra, mas, em um cenário mais realista, o efeito do Sol precisa ser considerado. Tem-se, assim, uma situação envolvendo o movimento de três corpos que interagem entre si gravitacionalmente. Apesar de inúmeras tentativas, Newton não conseguiu resolver esse problema – aliás, nem ele, nem as outras gerações de cientistas que a ele se seguiram.

A dificuldade em se achar uma solução para esse problema está em se encontrar nove quantidades, chamadas constantes de movimento. Na época, supunha-se que elas pudessem ser escritas em termos de equações algébricas. Porém, ainda em 1892, o matemático e astrônomo alemão Heinrich Bruns (1848-1919) mostrou que essa suposição era falsa.

Em conclusão, o problema geral dos três corpos só pode ser resolvido através de métodos numéricos.

Estratagema poderoso

Em meados de 1880, Poincaré passou a trabalhar no problema dos três corpos. Ele decidiu tentar um enfoque: procurar figuras geométricas associadas a soluções aproximadas (ou qualitativas), em vez de soluções precisas (ou quantitativas). Além disso, usou o chamado espaço de fase, onde se tem a representação instantânea da posição e da velocidade de um corpo e no qual as trajetórias associadas ao deslocamento de uma partícula no espaço são descritas em seis dimensões, três delas associadas à posição e as outras à velocidade.

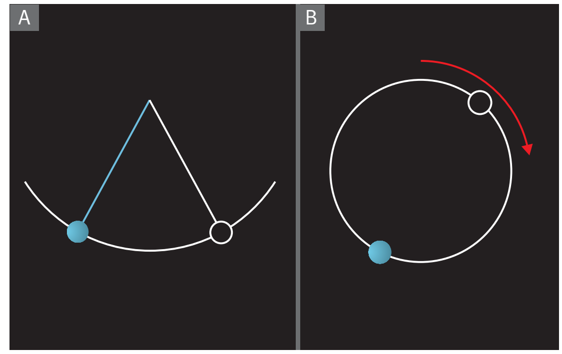


Figura 4. Conceito de espaço de fase. Em A, pêndulo simples em um suporte sem atrito e sob a ação da força da gravidade. Em B, trajetória correspondente do pêndulo no espaço de fase

Para entendermos esse conceito, vejamos o caso do pêndulo descrito na figura 4A. Em qualquer instante de tempo, seu movimento pode ser univocamente descrito pelo ângulo que o pêndulo faz com a horizontal e por sua velocidade instantânea. No espaço de fase, sua trajetória ao longo do tempo descreve uma curva em um espaço bidimensional, conforme aparece na figura 4B.

Continuando suas aproximações, Poincaré decidiu utilizar uma versão mais restrita do problema. Tomou dois objetos em movimento circular e considerou um terceiro, de massa muito menor que a dos dois primeiros e que se desloca no mesmo plano definido por estes. Esse é o chamado problema circular restrito dos três corpos, no qual o terceiro corpo – por exemplo, uma nave – sofre influência dos dois primeiros – podemos pensar na Terra e na Lua –, mas não os influencia.

Em vez de analisar a órbita completa descrita pelo terceiro corpo no espaço de fase, Poincaré introduziu um plano transversal à trajetória dele – como mostra a figura 5A – e analisou seu movimento, tomando por base os sucessivos pontos nos quais a trajetória perfura esse plano. A introdução desse plano – que é hoje denominado seção de Poincaré – foi um estratagema poderoso, pois simplificou sobremaneira a análise do problema.

Dinâmica caótica

No desenrolar de seu trabalho, Poincaré ficou particularmente impressionado e surpreso por ter encontrado órbitas que apresentavam um padrão aperiódico, mas cujas condições iniciais (posição e velocidade) eram muito próximas das de órbitas

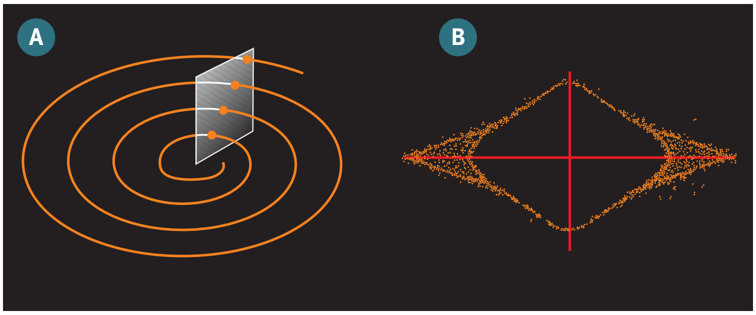


Figura 5. Em A, conceito de seção de Poincaré: um plano que intercepta as trajetórias. O problema passa a ser examinado através da análise dos pontos que são gerados na seção de Poincaré quando a trajetória a perfura. Em B, estrutura complexa dos pontos deixados pelas órbitas 'mal comportadas' (caóticas) na seção de Poincaré no caso do problema restrito circular dos três corpos

periódicas. Visto através da seção de Poincaré, o padrão de pontos deixados por essas órbitas 'mal comportadas' se assemelhava ao conjunto de marcas que as centenas de bolinhas de chumbo de um cartucho de caça deixam em uma parede (figura 5B) – note-se que, se a órbita em questão fosse periódica, esta sempre 'furaria' a seção de Poincaré segundo uma seqüência de pontos que se repetiria ao longo do tempo. Além disso, a seção mostrava que esses pontos ocupavam o espaço de fase de modo estranho: havia regiões densamente ocupadas, enquanto outras não apresentavam ponto algum (figura 5B).

Poincaré compreendeu que seria difícil estimar, depois de um certo tempo, a órbita de um planeta que apresentasse esse comportamento. Em seu trabalho, ele descreveu esse conjunto de pontos como um padrão tão complexo que ele sequer se aventurava a desenhar. O que ele vislumbrou foi justamente o movimento que hoje denominamos dinâmica caótica.

Sistema sensível

Os resultados de Poincaré levaram quase 100 anos para serem adequadamente entendidos. A existência da dinâmica caótica – ou simplesmente caos – foi, contudo, discutida pelos matemáticos ao longo dessas décadas, com contribuições importantes, entre outros, da dupla inglesa Mary Lucy Cartwright (1900-1998) e John Littlewood (1885-1977), dos norte-americanos George Birkhoff (1884-1944), Norman Levinson (1912-1975) e Stephen Smale, bem como do russo Andrei Kolmogorov (1903-1987) e do brasileiro Maurício Peixoto e seus estudantes.

No entanto, o impacto do caos nas ciências só começou a ser reconhecido em 1963, quando o meteorologista norte-americano Edward Lorenz, analisando um modelo numérico associado à previsão do tempo, redescobriu, em relação às suas conseqüências físicas, o movimento caótico e sua característica fundamental: a sensibilidade a variações das condições iniciais.

No trabalho de Lorenz e de muitos que se seguiram, é importante realçar o papel relevante do computador, que permitiu a análise adequada da dinâmica caótica. Isso se deve não só à capacidade de o computador gerar um número assombroso de soluções associadas a várias condições iniciais, mas também àquela de representar essas soluções através de gráficos elaborados que realçam significados qualitativos.

Mas retomemos uma questão importante. O que significa essa sensibilidade a variações das condições iniciais? Voltemos ao problema dos três corpos – Terra, Lua e uma nave espacial, por exemplo. Nosso objetivo é lançar várias vezes a nave e observar como sua trajetória varia sob a influência do campo gravitacional do sistema Terra-Lua. Para isso, anotamos as condições iniciais (posição e velocidade) do primeiro lançamento e, para os seguintes, fazemos alterações mínimas, quase imperceptíveis, nesses valores. Era de se esperar que as trajetórias fossem praticamente semelhantes do início ao fim. Mas isso só acontece nos primeiros instantes. Com o passar do tempo, elas se afastam tanto uma das outras que passam a praticamente não ter correlação alguma entre elas – no vocabulário da matemática, diz-se que elas se separam em média exponencialmente.

Em outras palavras, quando um sistema é caótico, pequenas alterações em suas condições iniciais – ou pequenas mudanças em seu estado – podem causar grandes alterações da trajetória depois de um certo tempo. Essa é a sensibilidade a variações nas condições iniciais.

Exatidão total?

Essa característica dos sistemas caóticos tem conseqüências dramáticas para avaliar como o sistema se comportará no futuro com base em dados obtidos experimentalmente sobre ele. Vamos a outro exemplo. Imagine que se está medindo um sistema cuja evolução é caótica com um termômetro. Esse sensor, por mais sofisticado que seja, apresenta os valores das medidas com um número limitado e finito de algarismos. Isso significa que não se consegue determinar, com total exatidão, o valor instantâneo da temperatura.

A imprecisão presente nos dados coletados experimentalmente – no caso, os valores da temperatura – nos levam a fazer uma previsão que se distancia cada vez mais do como o sistema real evolui. Após certo tempo, o comportamento desses dois cenários – ou seja, de nosso modelo teórico e do sistema físico real – não tem a menor relação entre si.

Esse tipo de comportamento é uma propriedade fundamental associada à evolução temporal de um sistema caótico. E mais importante: independe da sofisticação dos modelos teóricos adotados para se estudar um sistema, dos aparelhos empregados nas medidas experimentais ou do método numérico para se chegar a uma solução das equações que o descrevem.

'Surfando' na trajetória caótica

Poincaré constatou que certas regiões da seção que ele idealizou eram densamente preenchidas por pontos – ou seja, a órbita que ele estava estudando (no caso, a do terceiro corpo) passava inúmeras vezes por essas regiões. Estudos posteriores caracterizaram esse comportamento como uma das propriedades fundamentais das trajetórias caóticas. Os matemáticos chamam-na transitividade. Essas regiões podem ser vistas tanto na figura 5B quanto na figura 6.

Transitividade significa que, dados dois pontos quaisquer interiores a uma dessas regiões densamente preenchidas, existe uma trajetória do sistema que passe tão próximo quanto se queira desses pontos. Essa propriedade advém do fato de o movimento caótico ser um movimento aperiódico que se mantém confinado no interior de uma certa região do espaço. Para que uma determinada trajetória não passe duas vezes por um mesmo ponto – e, mesmo assim, se mantenha confinada em um espaço limitado –, ela termina por se dobrar sobre si mesma infinitas vezes, constituindo um enovelado que ocupa praticamente todo o espaço em que o conjunto caótico se mantém confinado. Uma analogia seria a de um novelo de lã de comprimento infinito a se desenrolar no interior de uma caixa fechada.

É justamente devido a essa distribuição espacial da trajetória que uma evolução caótica aparece na seção de Poincaré como uma região densamente preenchida por pontos. A propriedade da transitividade pode ser aproveitada de forma oportunística para se empreender o transporte entre dois pontos – em nosso caso, a transferência de uma sonda espacial entre dois pontos do espaço.

Assim, se esses dois pontos pertencerem a uma mesma região onde se tenha uma dinâmica caótica – a região periférica e com alta densidade de pontos na figura 6 – o que se precisa fazer é localizar uma trajetória caótica que passe próxima desses pontos. Feito isso, essa trajetória é usada para propiciar o transporte entre os pontos. Note que – dado que um sistema caótico tem a propriedade de transitividade – essa trajetória existe.

A grande vantagem desse enfoque é que, uma vez posicionada adequadamente a nave, é a própria dinâmica caótica do sistema que se encarrega de transportá-la até o destino desejado, sem gastos subseqüentes de energia. Tudo se passa como se a nave espacial passasse a 'surfar' em uma trajetória caótica.

Controle do caos

No entanto, essa estratégia caótica de transporte apresentava basicamente dois inconvenientes: a) o tempo de transporte e b) a localização dos pontos suficientemente próximos à origem e ao destino, associados a uma mesma trajetória. Na verdade, esses problemas estão interligados. Dados dois pontos quaisquer pertencentes a uma mesma região caótica, o transporte pode ocorrer, em geral, em um tempo finito – este é o próprio conceito de transitividade. Porém, esse intervalo de tempo pode ser arbitrariamente grande.

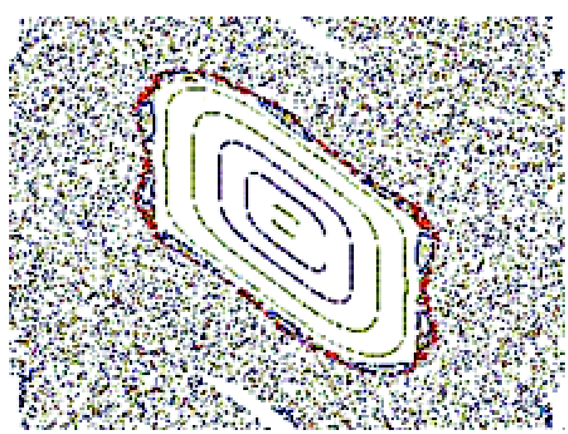


Figura 6. Espaço de fase representando um sistema com características similares às que estão presentes nos problemas envolvendo a reorientação de naves espaciais. Cada trajetória associada a uma diferente condição inicial – no caso da nave, posição e velocidade – aparece representada por pontos de cores diferentes. A região de alta densidade está associada a uma única trajetória caótica que preenche densamente o espaço que a envolve, expressão da propriedade transitiva. Note-se que existem outras trajetórias que não apresentam uma dinâmica caótica (região central da figura)

A órbita conveniente

Como achar uma órbita para levar uma nave, no menor tempo possível, da órbita em que ela está para uma outra préestabelecida? Para isso, é preciso localizar pontos no espaço de fase que estejam próximos à origem e ao destino e que pertençam à mesma trajetória. Depois disso, basta deslocar a nave – com um gasto mínimo de energia – para essa órbita de transporte e, a partir daí, deixá-la 'surfar' nessa trajetória caótica até seu destino.

A localização desses pontos se baseia em um procedimento geométrico. Os pontos próximos da origem têm sua evolução temporal verificada para tempos futuros, enquanto os vizinhos à posição final, para tempos passados. Esses dois conjuntos de pontos resultantes da evolução temporal definem regiões que se interseccionam sobre a seção de Poincaré.

Refinamentos subseqüentes desses pontos permitem chegar ao par de pontos suficientemente próximos à origem e ao destino, ambos pertencentes a uma trajetória próxima à posição inicial da nave que viabilize o transporte dentro do menor intervalo de tempo possível.

Intrínseco a essa estratégia está o eficiente aproveitamento da sensibilidade a variações nas condições iniciais. Como vimos, sensibilidade significa que pequenas perturbações são capazes de produzir alterações dramáticas, mudando completamente a evolução do sistema. E observe que uma pequena perturbação está, em geral, associada a gastos mínimos de energia.

Assim, a transferência entre regiões do espaço no âmbito de um sistema caótico pode se dar tão-somente à custa de um pequeno dispêndio de energia – uma perturbação suficiente para se ir da condição inicial original até a órbita conveniente de transporte.

O problema, assim, passa a ser o de encontrar pontos próximos que permitam o transporte dentro do menor tempo possível (ver 'A órbita conveniente'). Foi justamente a solução desse problema – bem como a explicitação de suas vantagens em relação a dispêndios de energia e ao aproveitamento adequado de pequenas perturbações – que um dos autores deste artigo (CG) propôs no início da década de 1990. Desde então, o conjunto dessas idéias – publicadas em um artigo na mais prestigiosa revista internacional de física – passou a ser conhecido por controle do caos, que vem se firmando como uma estratégia poderosa e de grande flexibilidade para se controlar adequadamente a evolução dos mais diversos sistemas, sejam eles físicos, biológicos, químicos, aeroespaciais etc.

O controle do caos abriu uma nova área de pesquisa sobre as aplicações práticas e tecnológicas da teoria dos sistemas caóticos.

Da teoria à prática

A idéia do controle do caos está baseada no fato de que um sistema caótico é sensível a pequenas perturbações, que, vale ressaltar, implicam gastos mínimos de energia. Em especial, o controle do caos foi aplicado com sucesso nas mais diversas simulações de sistemas físicos. A grande dúvida era se poderia ser empregado – e com o mesmo sucesso – em sistemas físicos reais. Os fatos vieram a comprovar de forma irretocável que sim.

Quando o cometa Halley visitou a Terra pela última vez, os norte-americanos decidiram explorar esse corpo celeste com a sonda espacial ISEE-

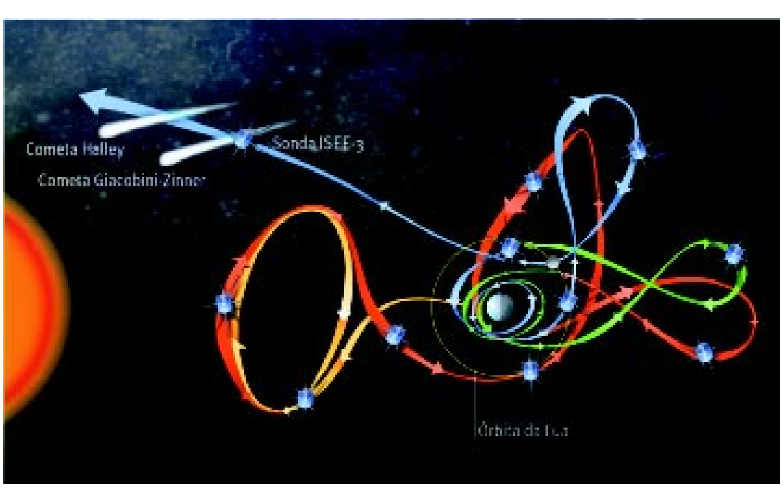


Figura 7. Representação da complexa trajetória que conduziu a sonda ISEE-3 de sua posição original até às proximidades dos cometas Giacobini-Zinner e Halley

3 – que fora lançada para investigar as interações entre a magnetosfera (uma das camadas mais altas da atmosfera terrestre) e o vento solar. Contudo, para concretizar essa nova tarefa, seriam necessários gastos vultosos de combustível para direcioná-la até o cometa, caso se empregasse os métodos clássicos de transferência de órbita. A quantidade necessária de combustível não existia em seus reservatórios, pois a ISEE-3 já estava próxima ao término de sua missão original.

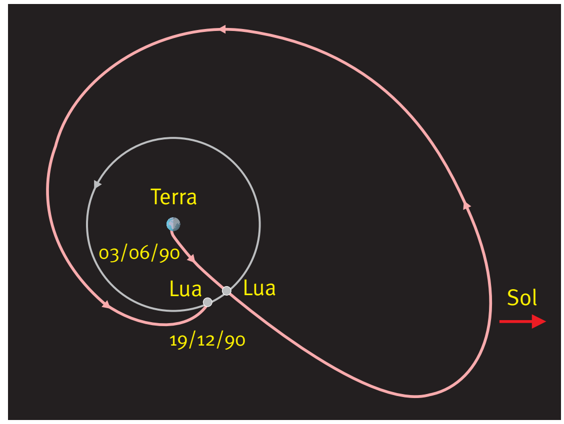
Foi quando se decidiu explorar a sensibilidade a pequenas perturbações no contexto do sistema sonda-Terra-Lua. Assim, se empreendeu uma seqüência de pequenas e sucessivas perturbações, que fizeram com que a sonda passasse cinco vezes próxima à Lua, sendo que, na última vez, a pouco mais de 100 km. Como resultado dessa seqüência de manobras – que sequer gastaram o restante de combustível que havia disponível –, a sonda não só passou a uma distância adequadamente próxima do Halley para explorá-lo, como também se aproximou e explorou o cometa Giacobini-Zinner, que se aproximava da Terra (figura 7).

Salvando missões

Em seguida, surgiu outra grande oportunidade de verificação da eficácia da estratégia de controle do caos quando aplicada ao direcionamento orbital de sondas espaciais. Foi com a sonda japonesa Hiten, lançada em 1990, que deveria seguir uma transferência de Hohmann da Terra para a Lua e, uma vez em órbita lunar, lançar o módulo Hogoromo, cuja missão era explorar a superfície do satélite.

No entanto, um funcionamento inadequado do veículo lançador acabou por posicionar a sonda Hiten em uma trajetória elíptica ao redor da Terra. Como conseqüência, não existia combustível suficiente na sonda para transferi-la para a Lua via transferência de Hohmann. Foi quando Edward Belbruno e James Miller – então pesquisadores da Nasa (agência espacial norte-americana) e que tinham acabado de publicar um trabalho teórico sobre a utilização do controle do caos no direcionamento de espaçonaves – foram convidados a tentar aplicar essa técnica para salvar a missão.

O sucesso foi marcante: no início de 1992, a Hiten foi capturada pela Lua, após uma trajetória que a levou a uma região de comportamento notadamente caótico, situado a mais de 1,4 milhão de km da Terra (figura 8). E, assim, os japoneses se tornaram a terceira nação a ter enviado uma sonda espacial à Lua. Anos depois, a mesma técnica foi empregada para recuperar o satélite de comunicações Asiasat 3, que se posicionou em uma



BELBRUNO, E. *CAPTURE DYNAMICS AND CHAOTIC MOTION IN CELESTIAL MECHANICS*. PRINCETON, 2004

Figura 8. Trajetória utilizada para conduzir a sonda Hiten das proximidades da Terra (03/06/90) até a Lua. Na região a grande distância da Terra, a influência conjunta da Terra, Lua e do Sol proporciona uma região de dinâmica caótica que foi eficientemente explorada para levar a nave até uma órbita lunar (19/12/90)

órbita inadequada ao redor da Terra, após uma falha de seu veículo lançador.

Graças a essas histórias de sucesso, o controle do caos e a reorientação caótica são hoje considerados como a estratégia mais adequada para transferência orbital sempre que a questão principal for o uso da menor quantidade possível de combustível.

Os desafios

O tema controle do caos continua atualíssimo, envolvendo esforços intensivos de pesquisa, tanto nas mais prestigiosas instituições internacionais quanto nas brasileiras, em particular no Instituto de Física da Universidade de São Paulo e no Laboratório de Computação e Matemática Aplicada do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe), em São José dos Campos (RJ).

Os desafios atuais estão direcionados para a obtenção de métodos que: a) sejam aplicáveis a sistemas que envolvam um número elevado de corpos com massas diferentes; b) combinem estratégias clássicas e caóticas, de modo a permitir o transporte de sondas espaciais com a máxima eficiência; c) otimizem o tempo de transporte via trajetória caótica; d) sejam aplicáveis ao controle de um conjunto de satélites agrupados em constelação; e) proporcionem o controle de posicionamento de um satélite em relação aos seus eixos de referência.

Indiscutivelmente, o controle do caos é uma área em evolução, dentro do escopo da excelência da pesquisa multidisciplinar. ■

SUGESTÕES PARA LEITURA

OTT, E., GREBOGI, C. e YORKE, J. A. 'Controlling Chaos' in *Physical Review Letters*, vol. 64, pp. 1196-1199 (1990)

SHINBROT, T., GREBOGI, C., OTT, E. e YORKE, J. A. 'Using small perturbations to control chaos' in *Nature* vol. 363, pp. 411-417 (1993)

ADLER, R. 'To the planets on a shoestring' in *Nature*, vol. 408, pp. 510-512 (2000)

GLEICK, J. *Caos*. Campus, Rio de Janeiro, 1990

STEWART, I. *Será que Deus joga dados? – A nova matemática do caos*. Jorge Zahar, Rio de Janeiro, 1991

Na internet:

WADE, M. *ISEE, Encyclopedia Astronautica* (em inglês) http://www.astronautix.com/craft/isee.htm