

ORDEM E CAOS NO SISTEMA SOLAR

Fernando Roig

Observatório Nacional

Kepler (1571–1630)

- Órbitas dos planetas em torno do Sol são **elipses** (em primeira aproximação)
- Conservação do momento angular (maior velocidade perto do Sol)
- Lei dos períodos: $T^2 = kr^3$

Newton (1643–1627)

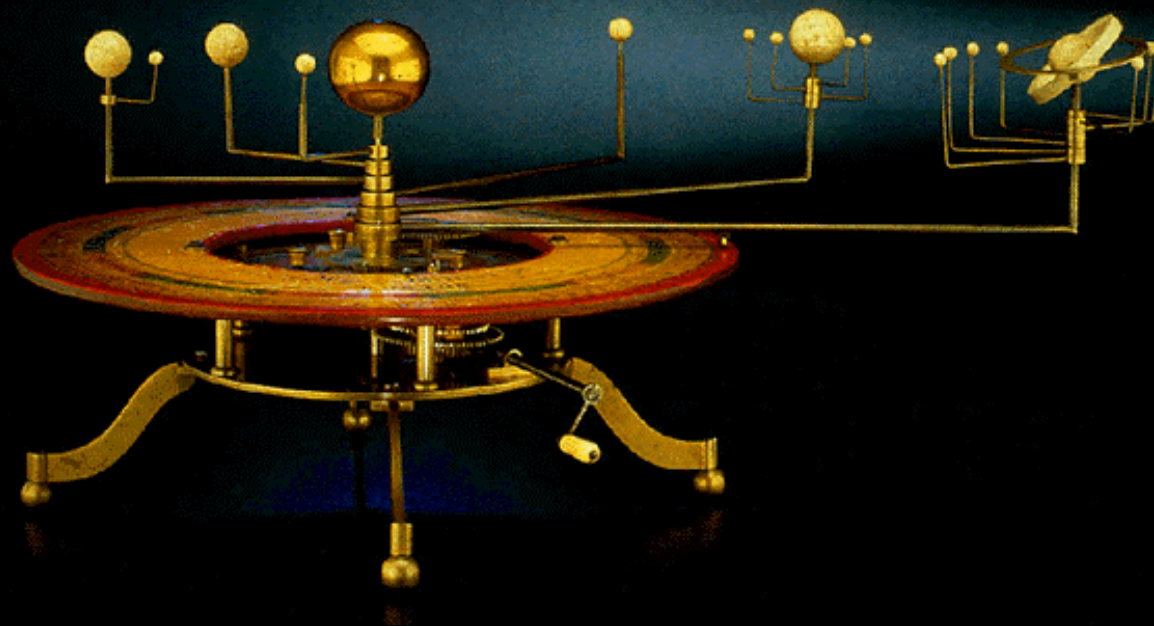
- Princípio de inércia: $F = ma$
- Lei da gravitação: $F = \frac{Gm_1m_2}{d^2}$

O Relógio de Newton

- O universo é um grande “relógio” onde os fenômenos são descritos por leis universais
- As leis são representadas por sistemas de equações diferenciais, cuja solução existe e é única para uma dada condição inicial
- Conhecendo o estado dinâmico de um sistema no presente é possível conhecer todos seus estados no passados e no futuro: determinismo

Século XVIII

- Graham constrói o primeiro “orrery”, máquina para prever a posição dos planetas



Século XIX

- Os astrônomos percebem que o problema dos 3 corpos não possui solução exata. Procuram-se aproximações
- Surge a teoria de perturbações: Adams e Leverrier predizem a existência e localização do planeta Netuno, que logo é descoberto (1846)
- Poincaré (1892) demonstra que o problema de N corpos não é integrável: não é possível exprimir uma solução válida para todo instante de tempo. A solução só pode ser conhecida por intervalos de tempo curtos

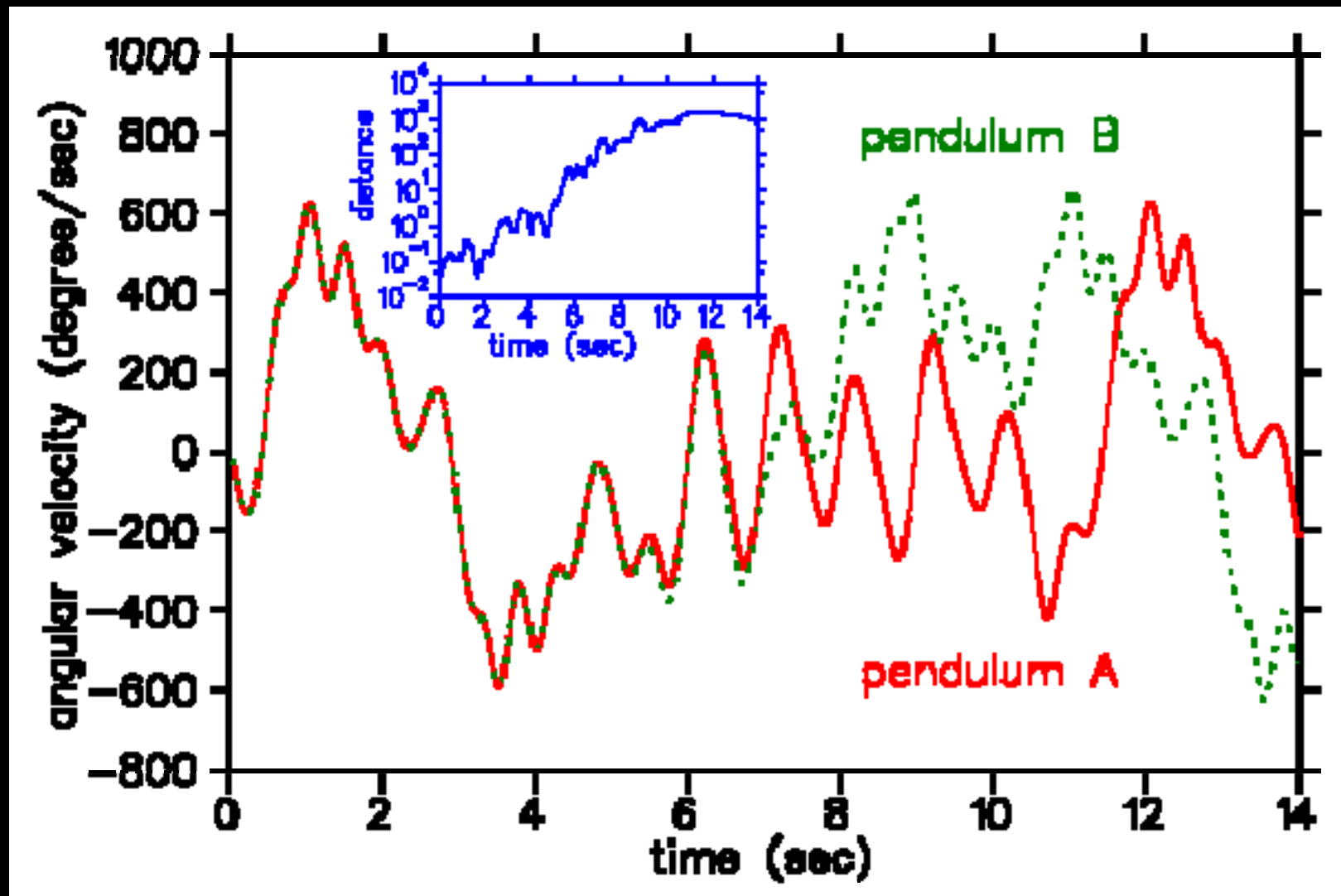
Século XX

- Analisando um modelo simples de atmosfera, Lorenz (1960) descobre o primeiro exemplo de caos num sistema dinâmico
- Wisdom (1982) apresenta as primeiras evidências de que o Sistema Solar é caótico

O caos é uma consequência da não integrabilidade

- Sistemas caóticos são caracterizados pela sensibilidade extrema às condições iniciais
- O sistema torna-se imprevisível a longo prazo, mas continua sendo determinista
- A imprevisibilidade é causada porque
 - Não conhecemos a solução em forma exata para todo tempo
 - Não conhecemos a condição inicial com suficiente precisão

Exemplo: Divergência exponencial de trajetórias vizinhas num pêndulo forçado

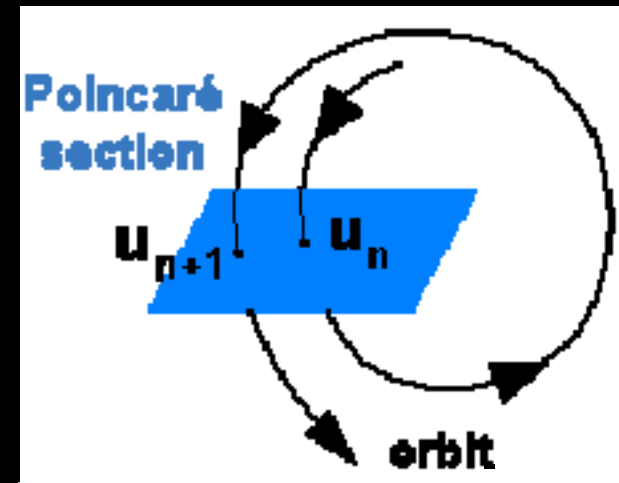
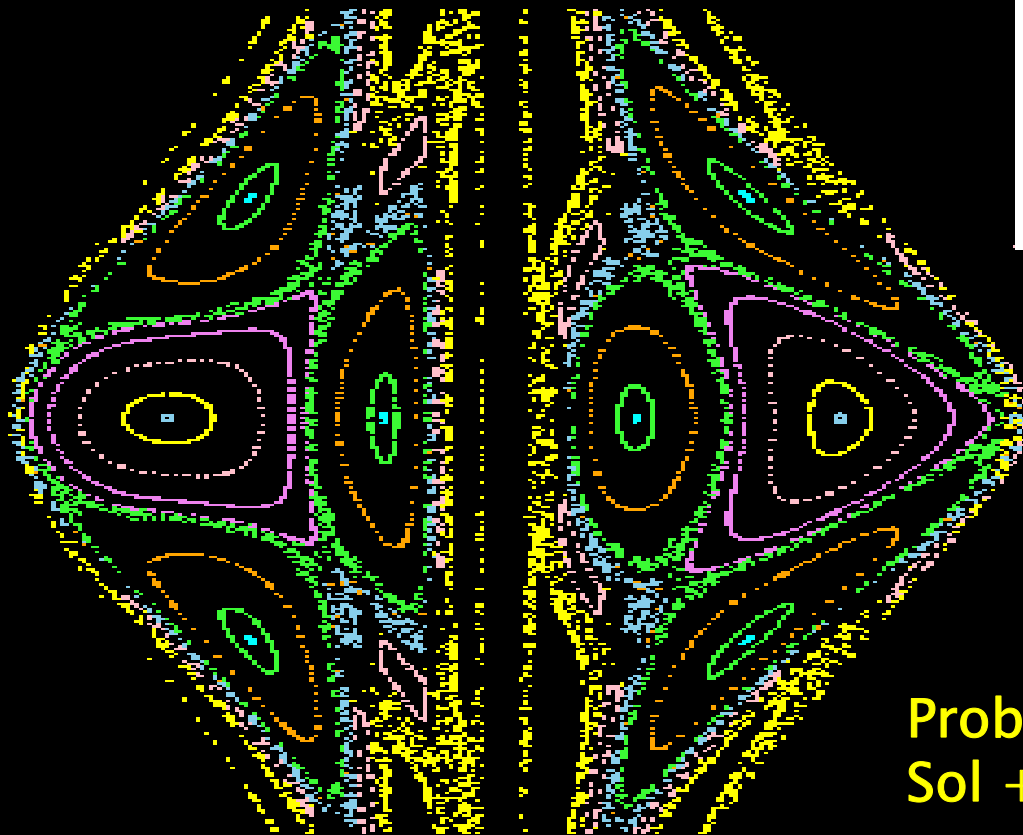


Instabilidade e caos

- Uma trajetória é **estável** se qualquer trajetória vizinha permanece vizinha indefinidamente. A distância mútua entre as trajetórias **não muda com o tempo**. O conceito de estabilidade é sempre relativo
- Sistemas **instáveis** também são sensíveis a pequenas mudanças nas condições iniciais da trajetória. Os erros se propagam segundo uma **progressão aritmética**
- Em sistemas **caóticos** os erros se propagam segundo uma **progressão geométrica**

Ferramentas para detectar caos

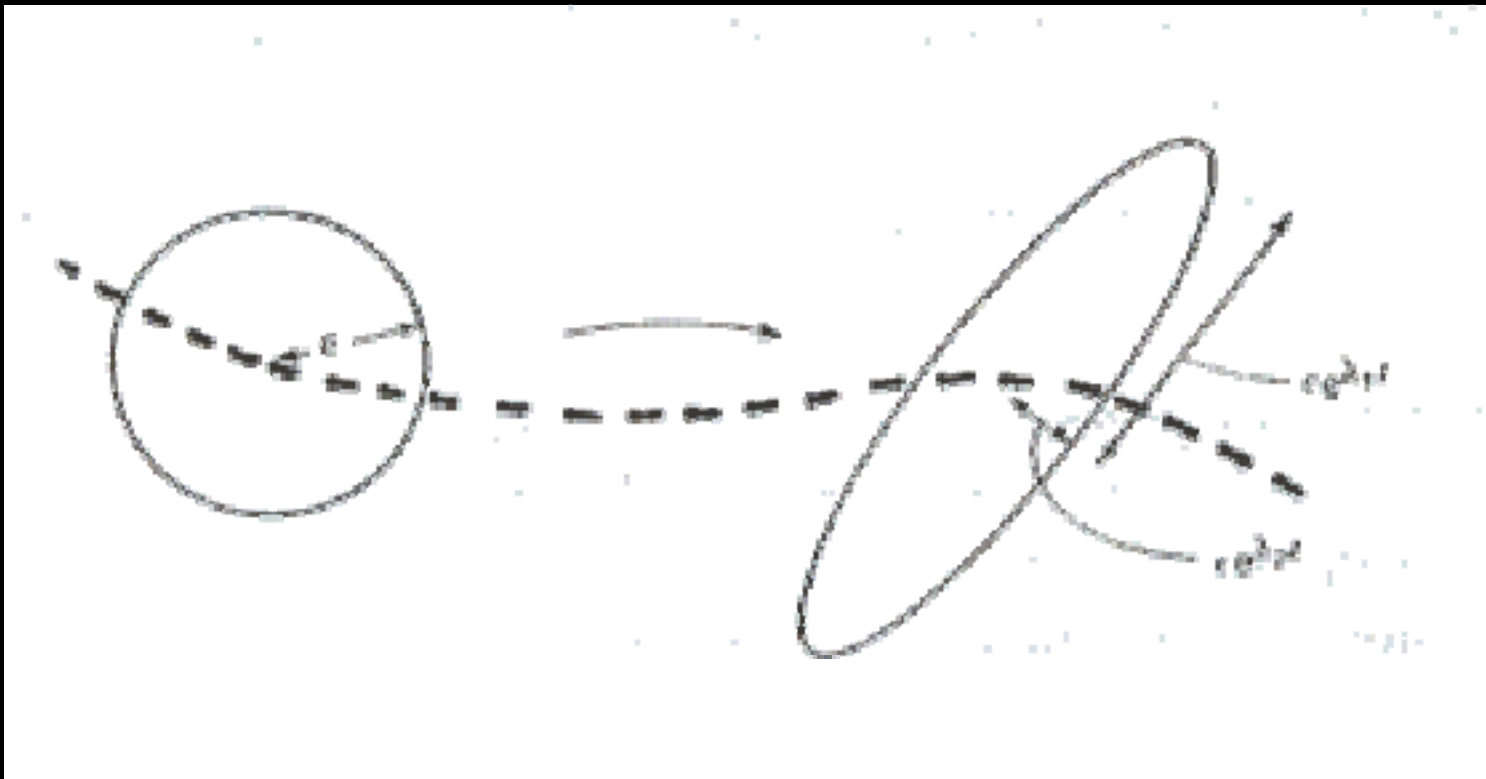
- Mapas de Poincaré



Problema de 3 corpos:
Sol + Júpiter + Terra

Ferramentas para detectar caos

- Expoentes de Lyapunov $\varepsilon = \varepsilon_0 e^{\lambda t}$



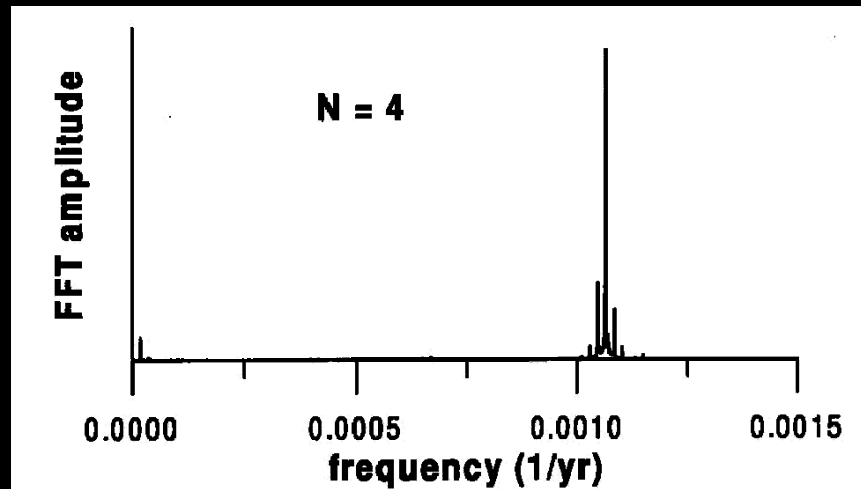
Regular = 0

Caótico $\neq 0$

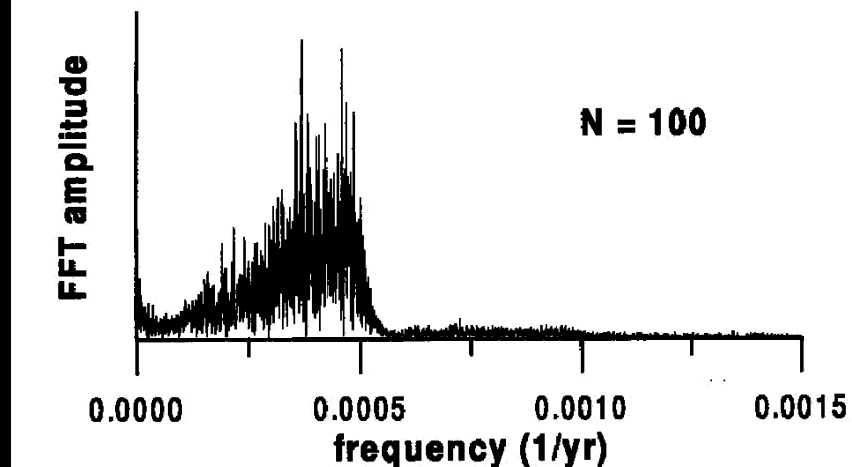
Ferramentas para detectar caos

- Análise de frequências

Regular

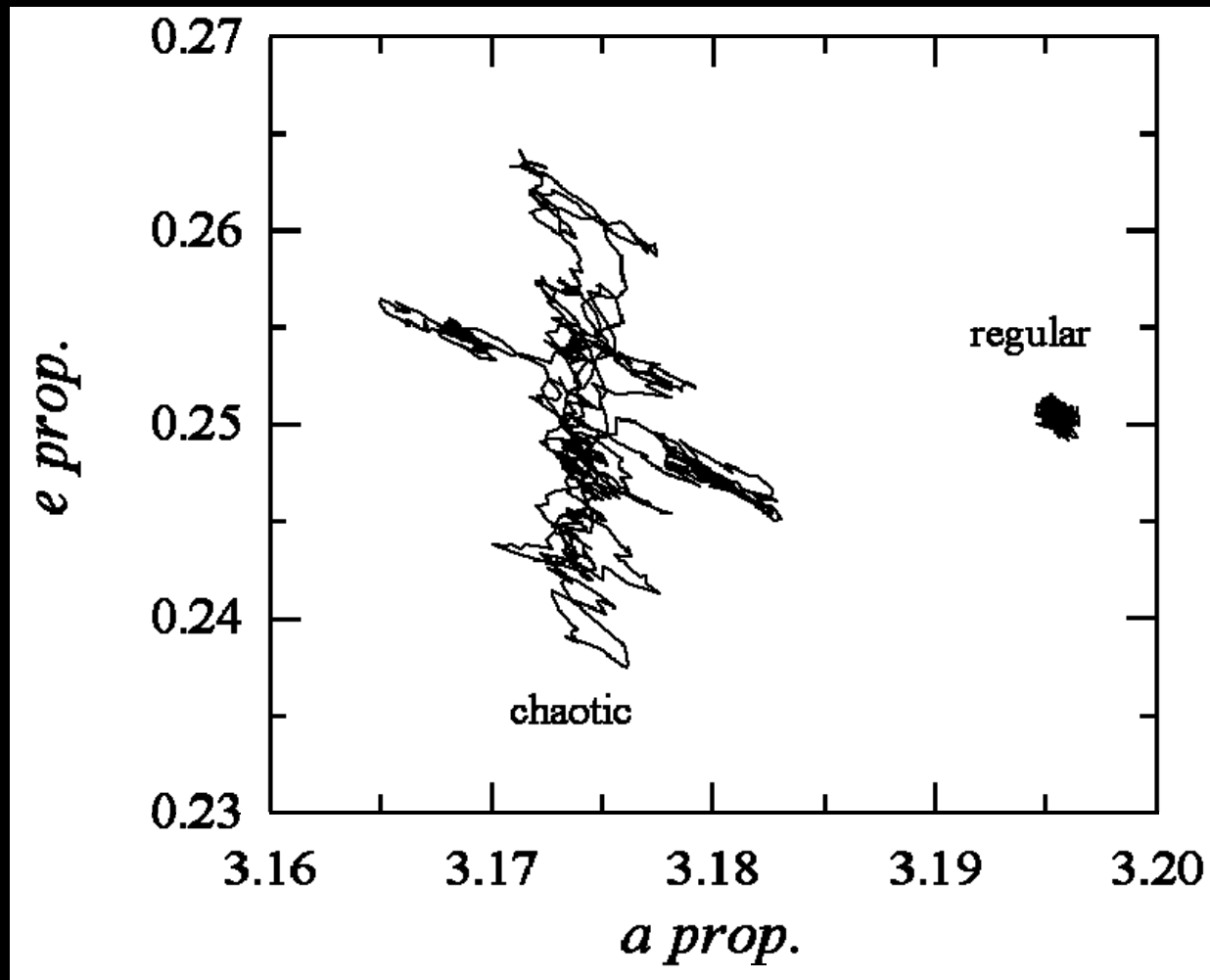


Caótico



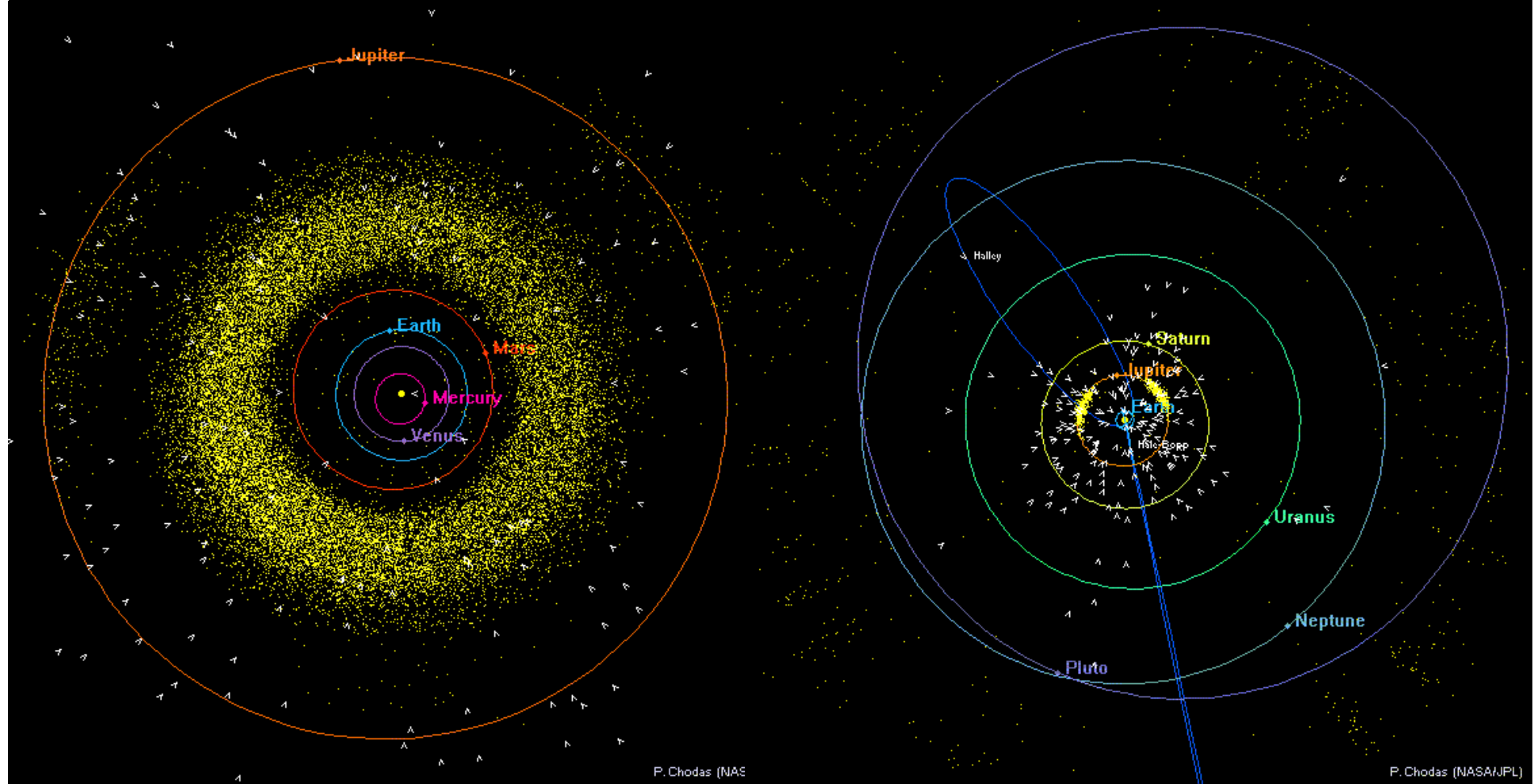
Ferramentas para detectar caos

- Evolução de elementos próprios



Caos no Sistema Solar

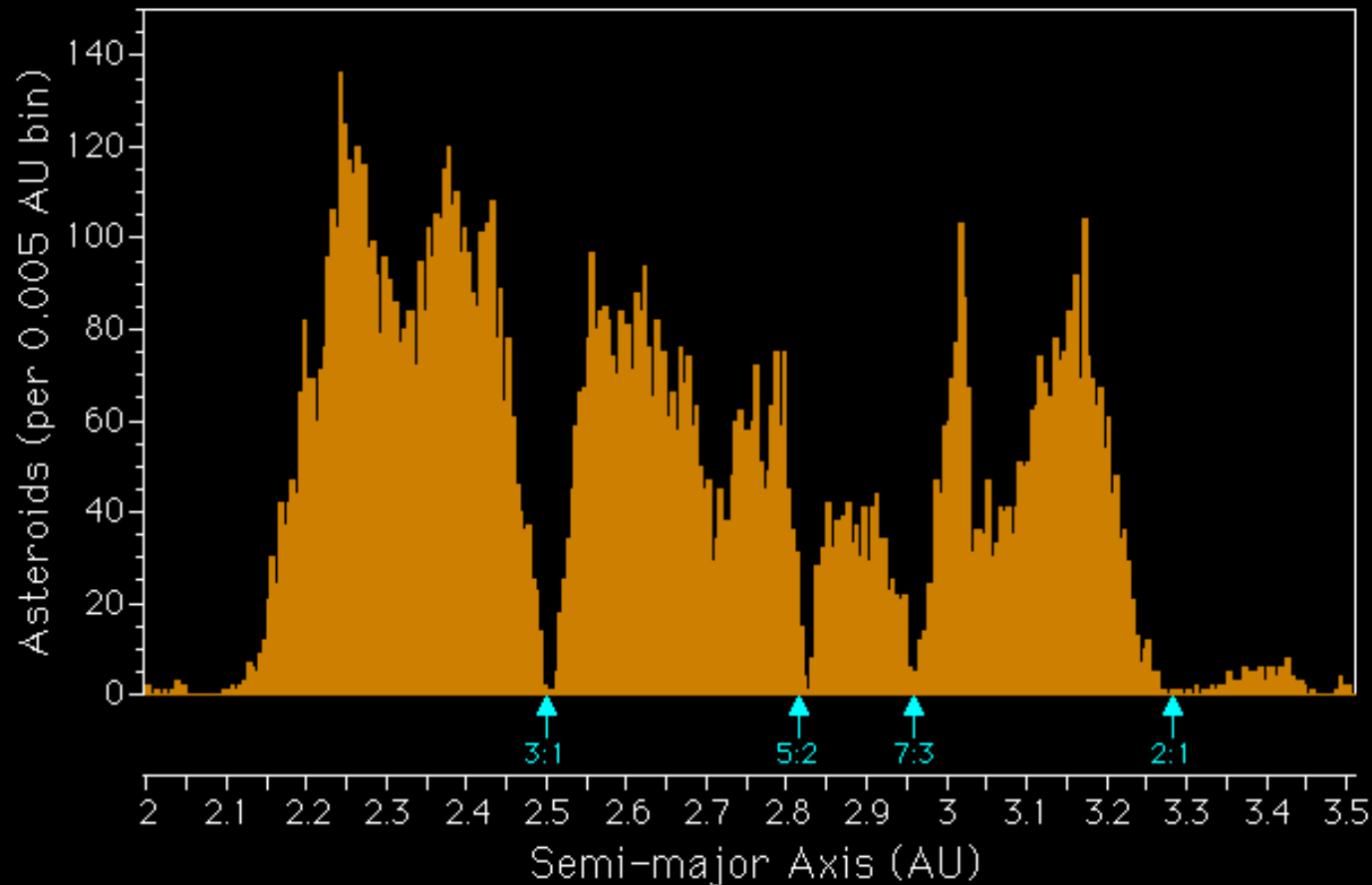
- O Sistema Solar é caótico: o caos se manifesta, em maior ou menor medida, em todas as populações de objetos



As falhas de Kirkwood

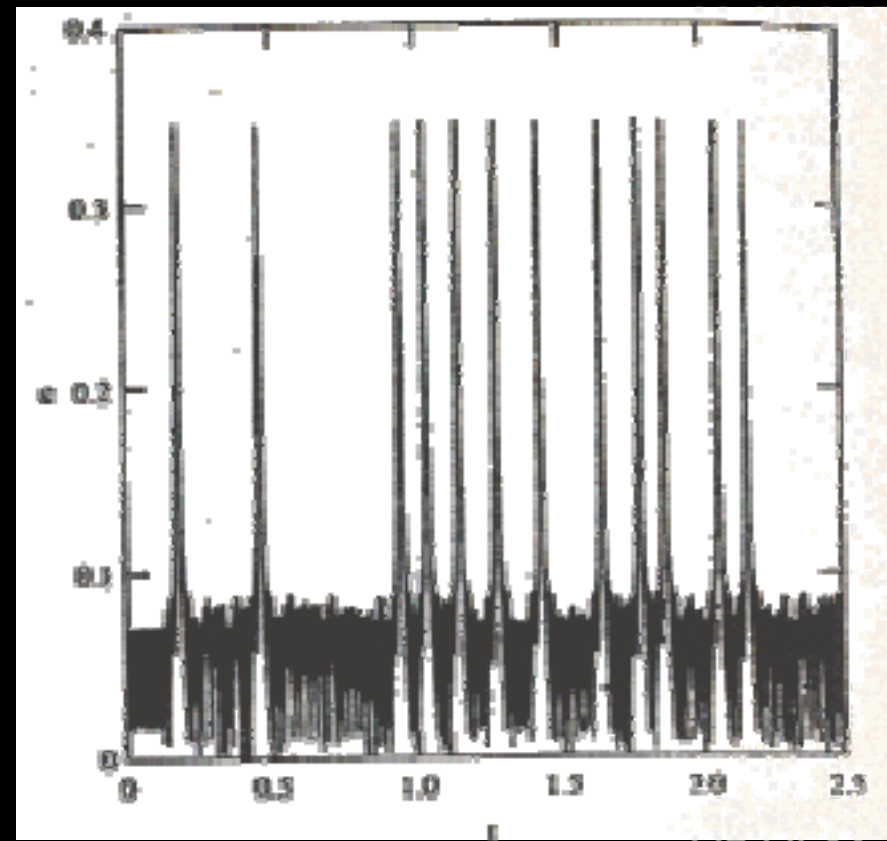
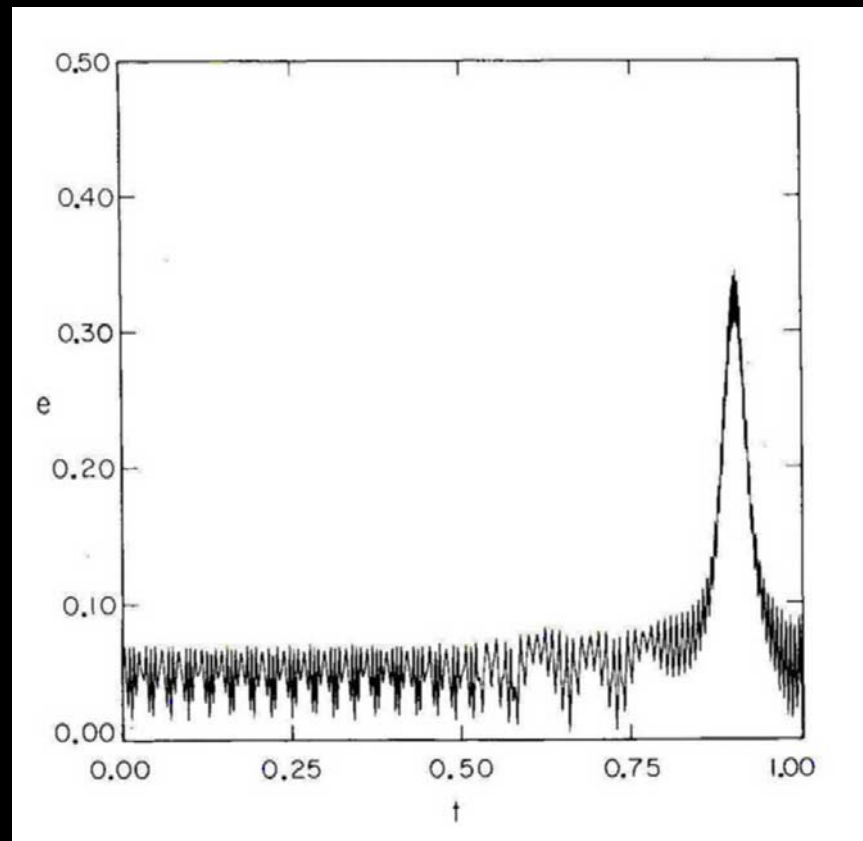
- Kirkwood (1867) descobre que a distribuição dos asteróides não é uniforme

Main Asteroid Belt Distribution
Kirkwood Gaps



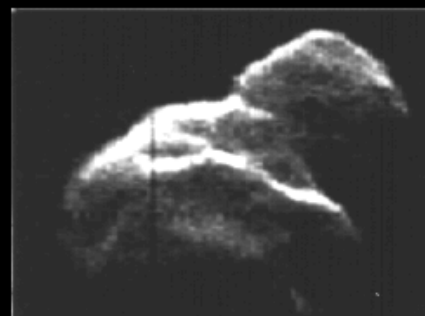
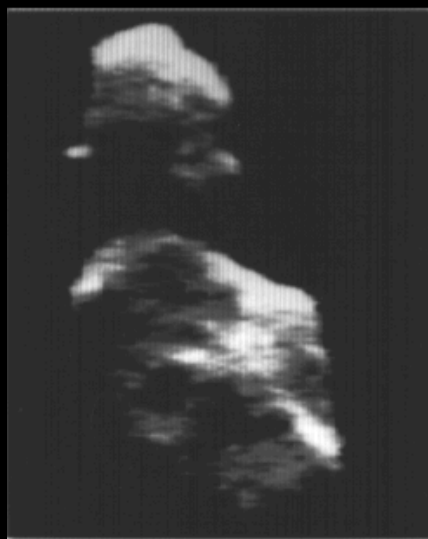
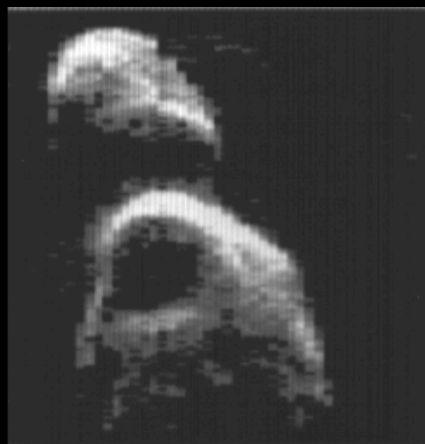
As falhas de Kirkwood

- Wisdom (1982) consegue explicar a origem das falhas de Kirkwood



Asteróides próximos da Terra

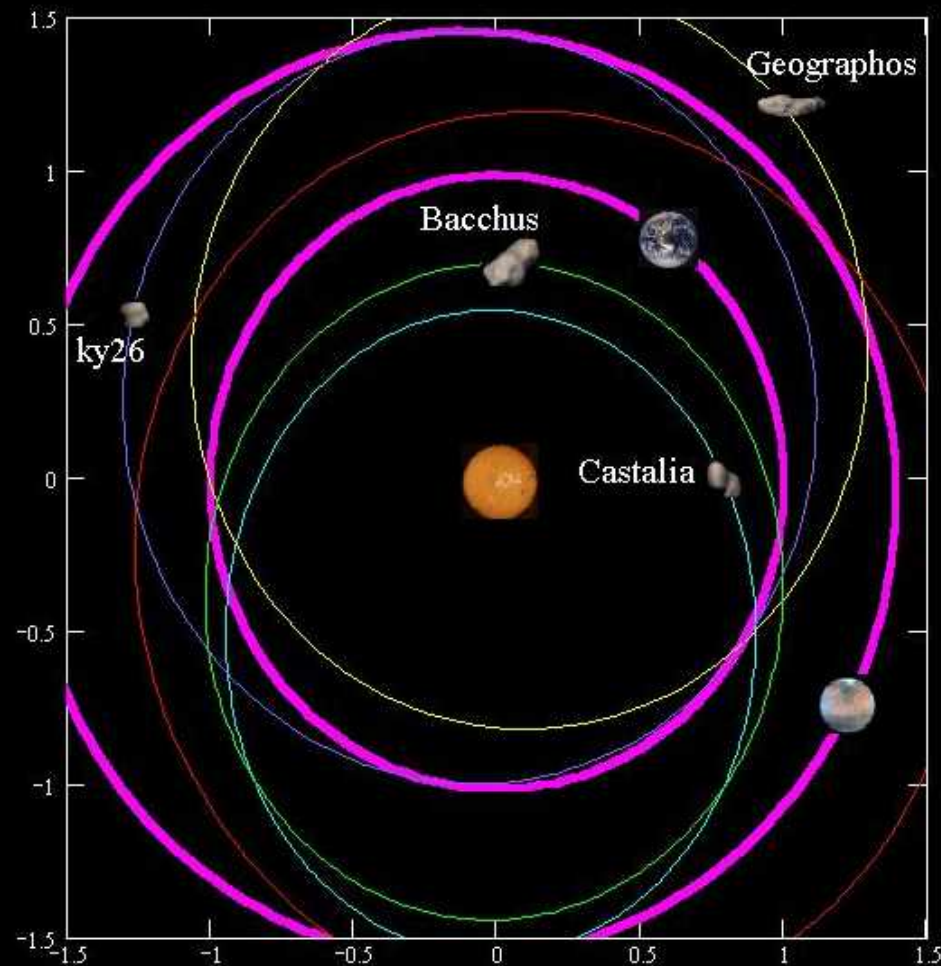
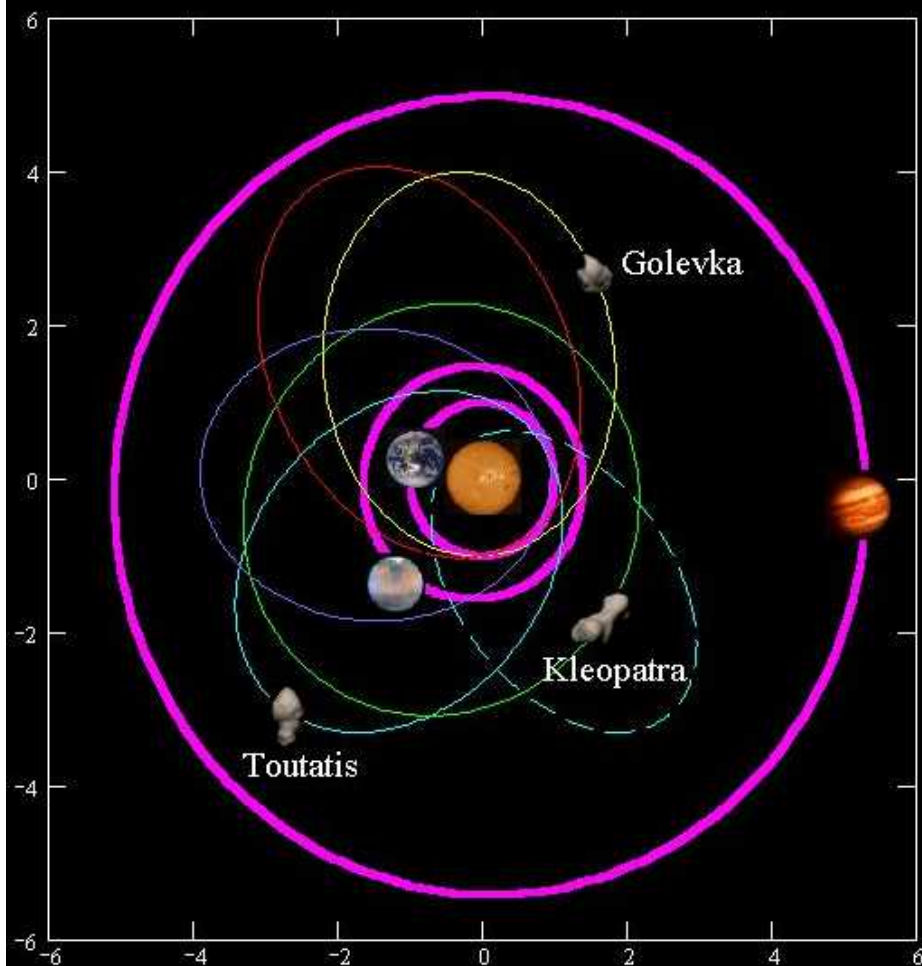
- A descoberta do asteróide (4179) Toutatis em 1989 confirmou a teoria de Wisdom



Aproximações
à Terra em 1992,
1996 e 2004

Asteróides próximos da Terra

- Porém, há muitos mais asteróides próximos da Terra dos que prediz o mecanismo de Wisdom...



O cinturão de Kuiper

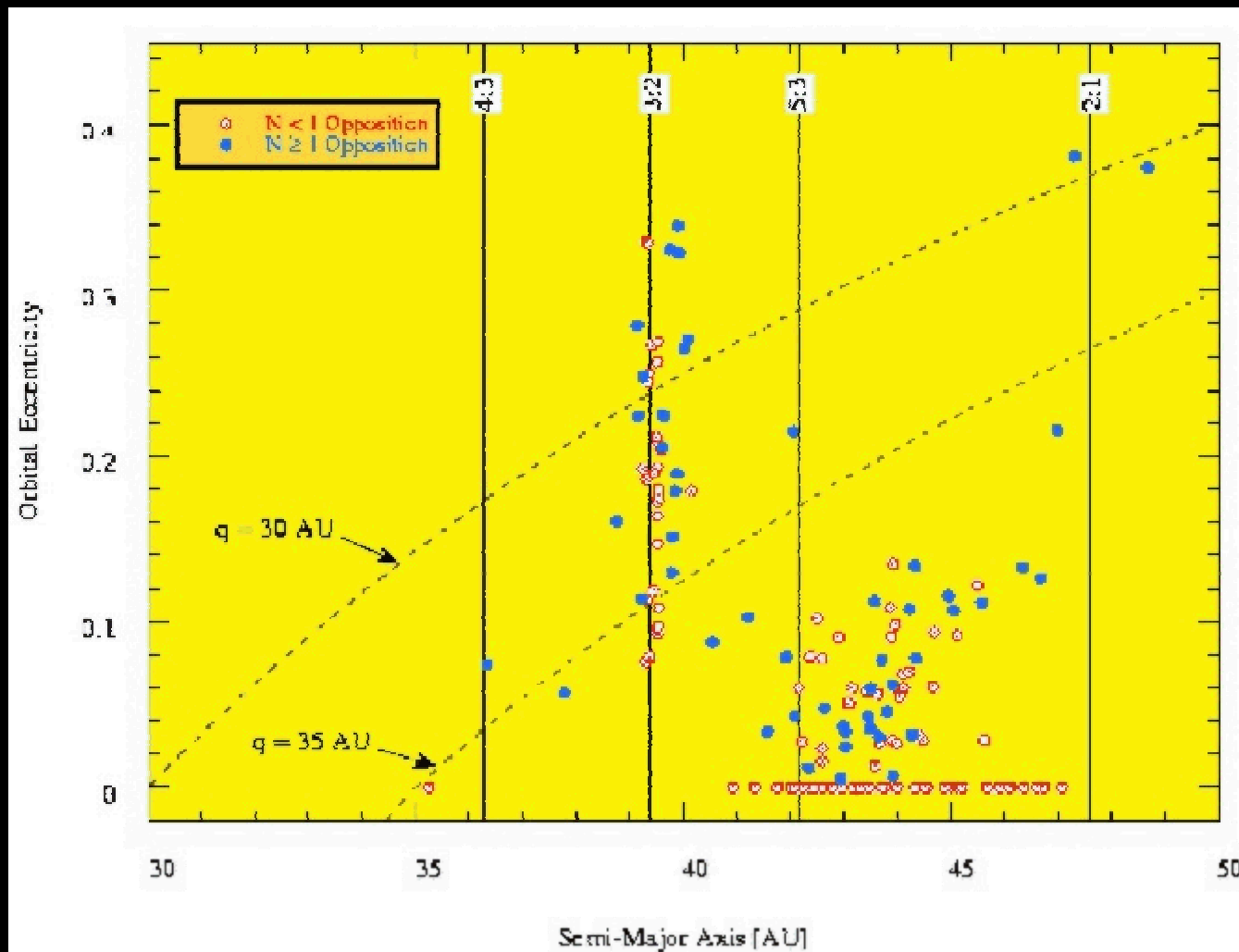
- Plutão foi descoberto em 1930



- Sussman e Wisdom (1987) mostraram que o movimento de Plutão é caótico em escalas de tempo de 1 bilhão de anos

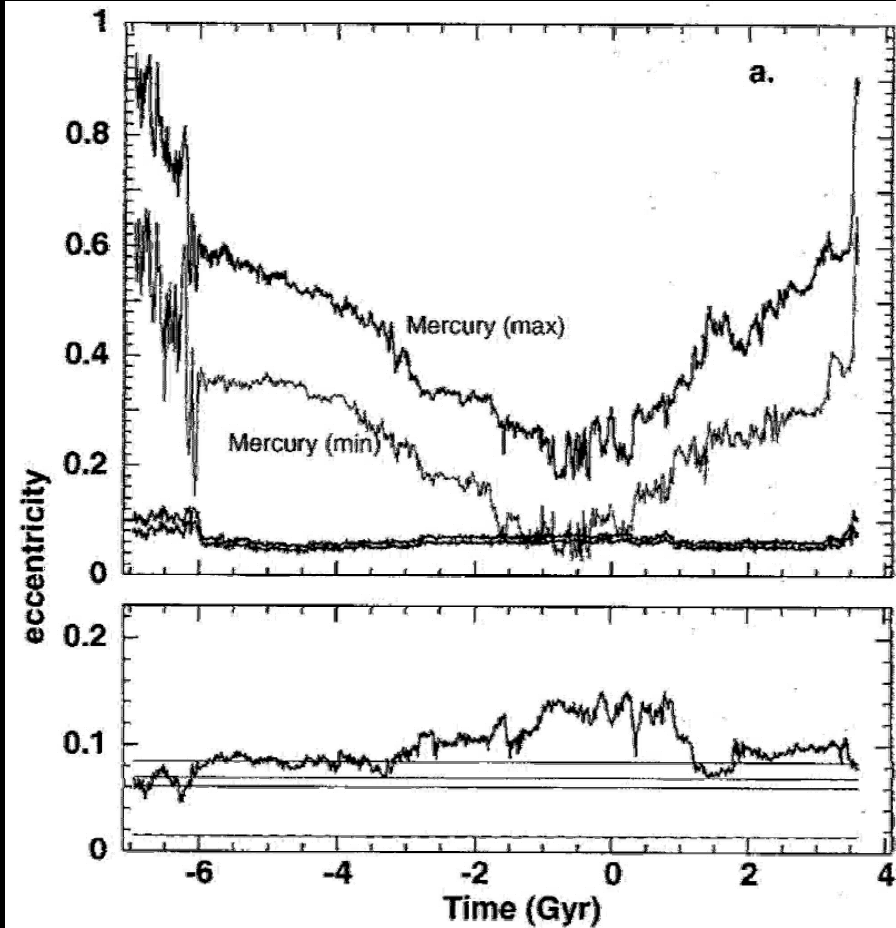
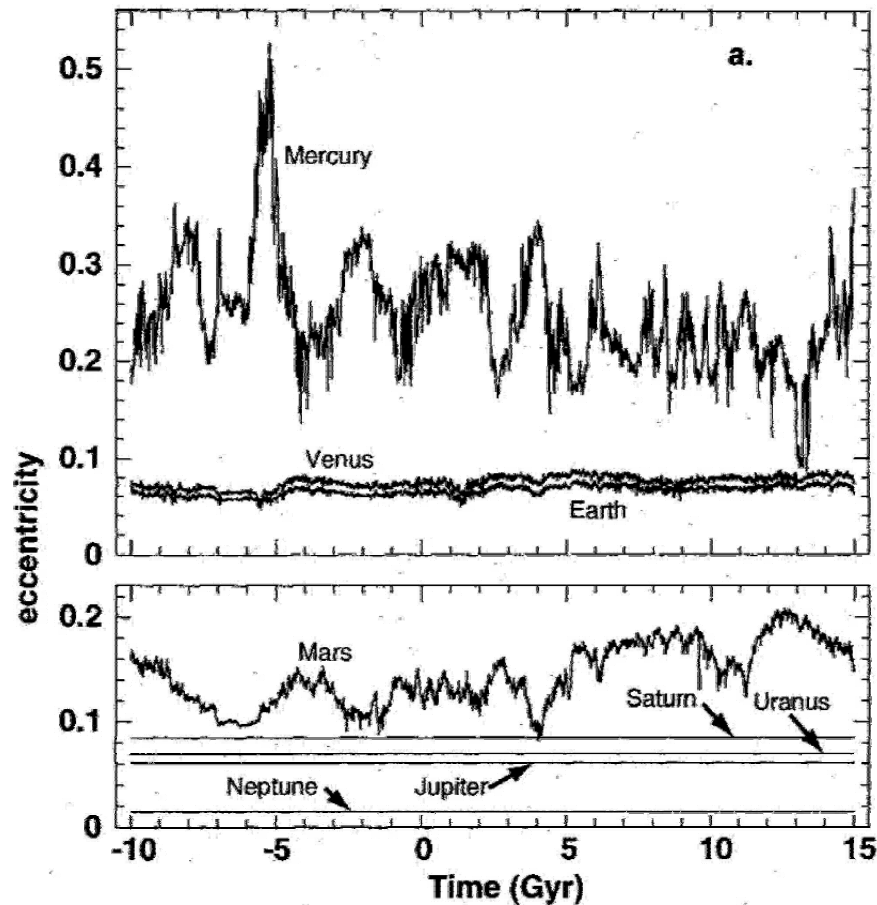
O cinturão de Kuiper

- O segundo objeto trans-Netuniano foi descoberto em 1993. Atualmente, conhecemos mais de 300 objetos no cinturão de Kuiper



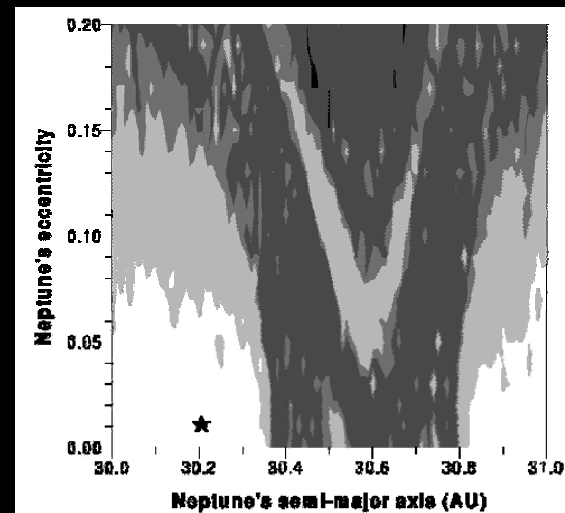
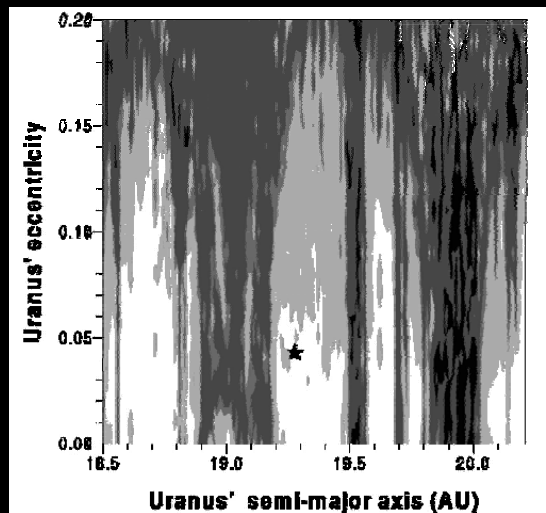
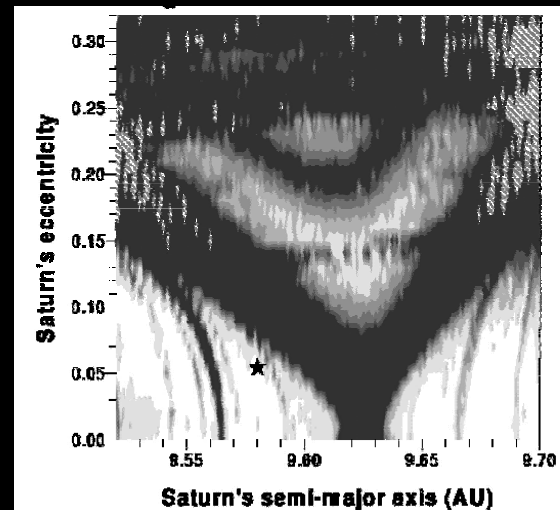
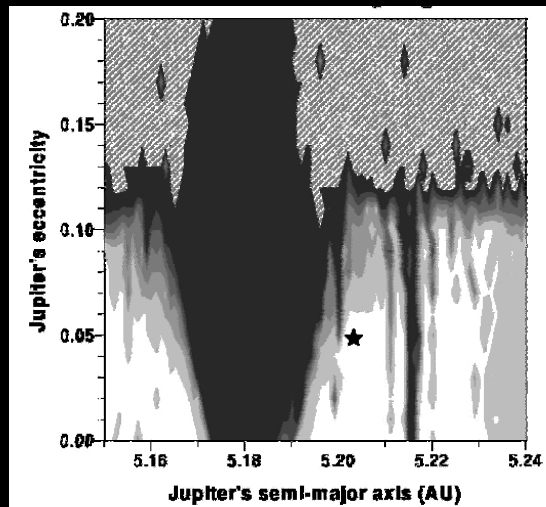
O Sistema Solar Interior

- Os planetas Terrestres evoluem caoticamente (Laskar 1994)



O Sistema Solar Exterior

- Os planetas jovianos encontram-se à beira do caos (Michtchenko 2001)

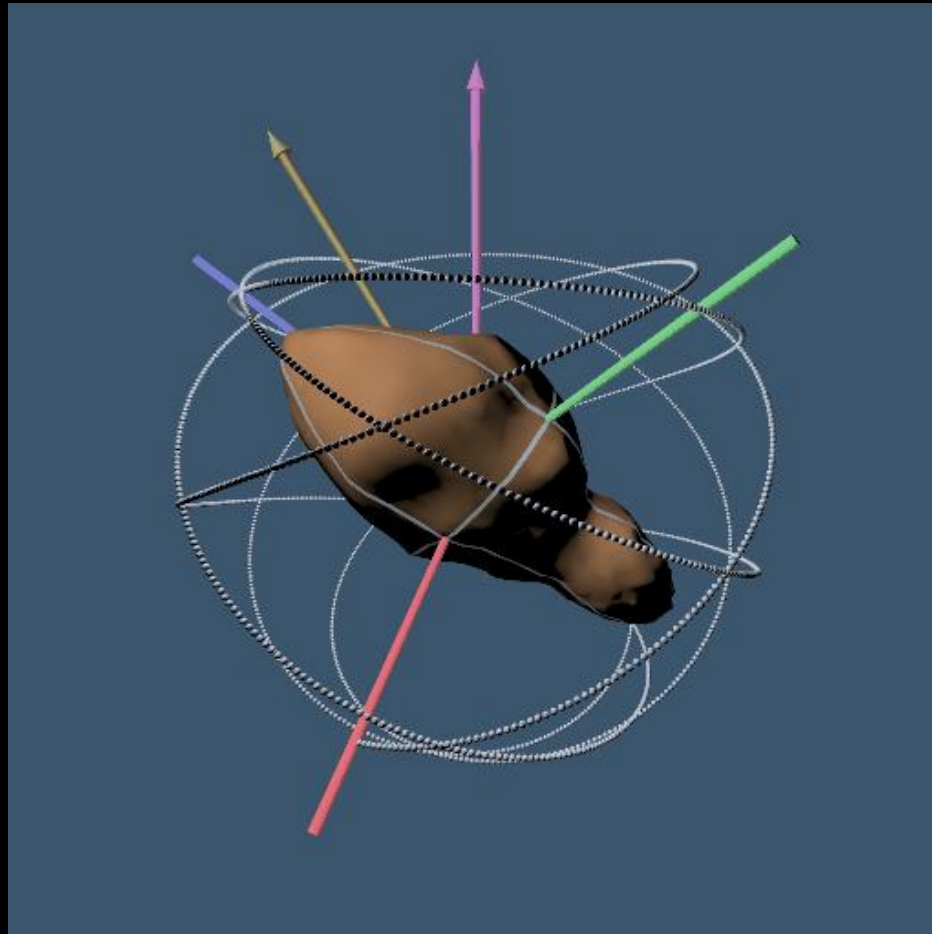


A rotação dos corpos

- Por causa de forças dissipativas (maré, arrasto, etc.) a rotação dos corpos tende a ser muito regular: **ressonâncias spin-órbita**
- **A rotação caótica dos corpos pode ser causada por diversos motivos:**
 1. Assimetria na forma do corpo
 2. Colisões
 3. Forças de maré
 4. Ressonâncias

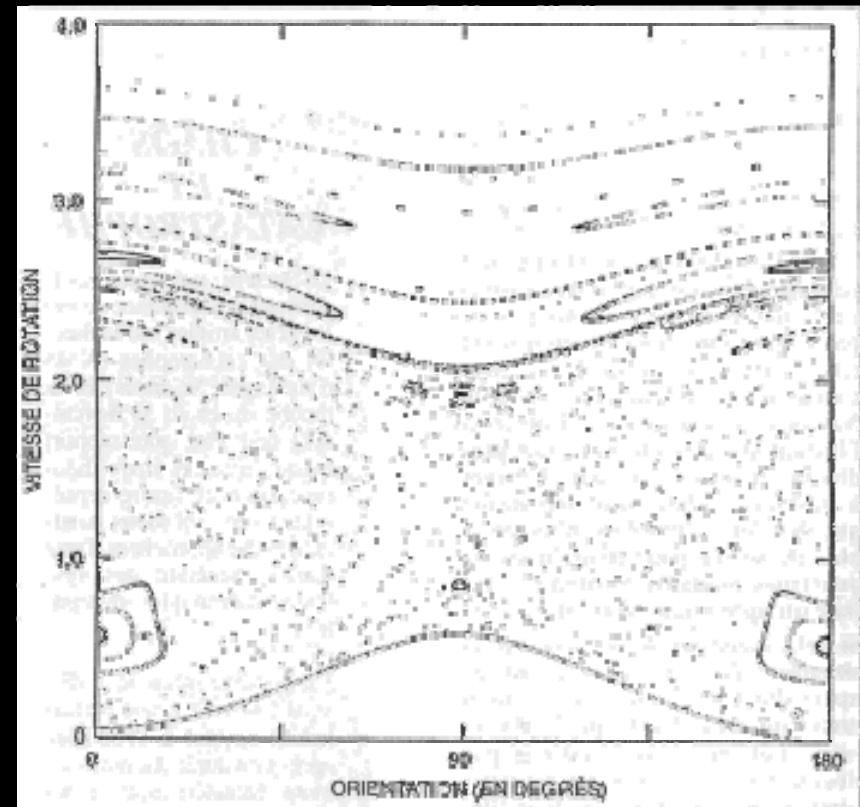
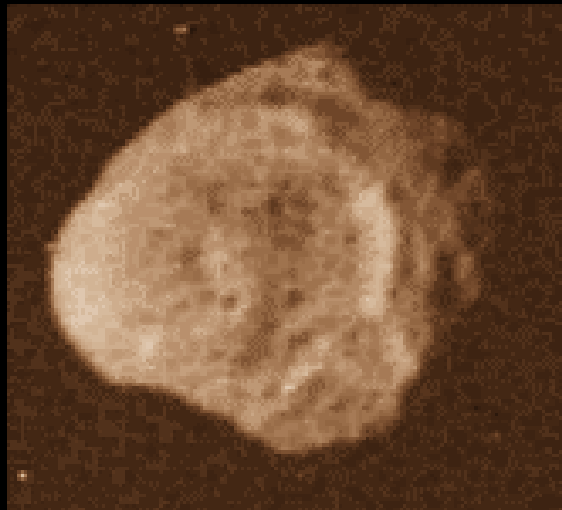
A rotação dos corpos

- As cambalhotas do asteróide Toutatis podem estar relacionadas a um tombo no passado



A rotação dos corpos

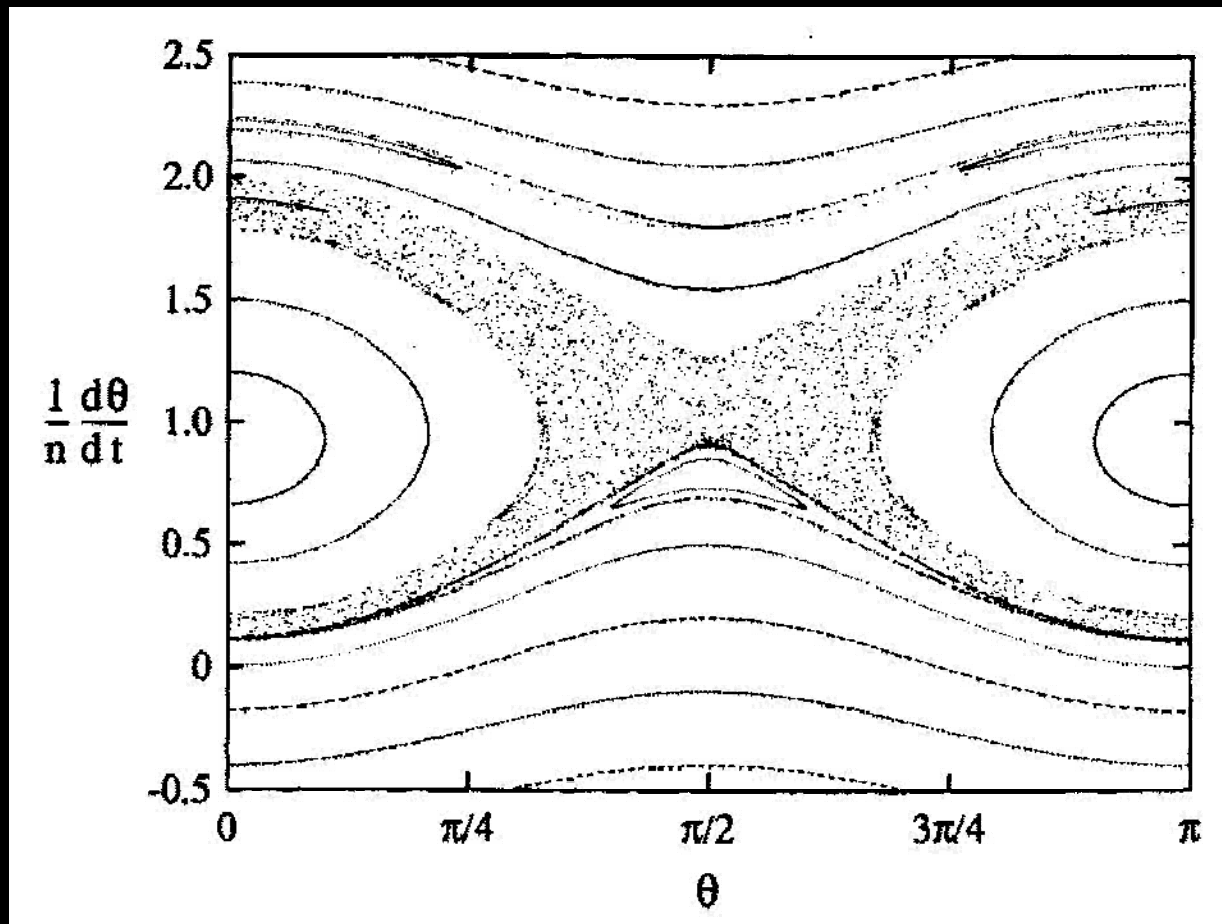
- O caos na rotação de **Hypérion** (satélite de Saturno) é devido à combinação entre a forma irregular do satélite, as forças de maré de Saturno e a ressonância 3/4 com Titã



- O erro na atitude de Hypérion cresceu 700 vezes nos 9 meses entre a passagem das Voyager I e II

A rotação dos corpos

- No caso de **Phobos**, sua rotação não é caótica, mas encontra-se numa ressonância spin-órbita que poderia manifestar caos



A rotação dos corpos

- A obliquidade (ângulo entre o eixo de rotação e o eixo da órbita) de Marte tem um comportamento caótico, causado por uma ressonância spin-órbita com Venus
- Variações caóticas da obliquidade podem acarretar mudanças climáticas significativas
- No caso da Terra, a presença da Lua evita que o eixo de rotação da Terra varie caoticamente

Sumário

- O caos no Sistema Solar é inevitável, devido aos muitos corpos que interatuam
- Os planetas evoluem caoticamente, mas as variações não são significativas em escalas de tempo de bilhões de anos
- No entanto, a evolução caótica dos planetas internos poderia produzir variações climáticas importantes: destruição da vida?

Sumário

- O caos relevante, que atua em escalas de tempo curtas, está vinculado às ressonâncias
- O papel das ressonância é o de intercambiar objetos entre as diferentes regiões do Sistema Solar
- O caos é responsável pelos asteróides e cometas que chegam próximos da Terra. O problema é que o movimento destes corpos é imprevisível