

Propriedades físicas e dinâmicas dos pequenos corpos do sistema solar

Fernando Roig
Jorge Carvano

Observatório Nacional
Escola de Inverno em Astrofísica 2025

Conteúdo

1. Dinâmica dos pequenos corpos

- Como são suas órbitas, como evoluem e qual é a sua origem
- Fernando – Segunda e Quinta-feira

2. Propriedades físicas dos pequenos corpos

- Qual é a sua composição, formas, etc.
- Jorge – Terça e Quinta-feira

O que são pequenos corpos?

- Objetos do sistema solar que não sejam planetas ou satélites
- Formam grupos ou populações, com características orbitais (e físicas) comuns
 - Asteroides (MBAs, NEAs, Centauros, Troianos, etc.)
 - Objetos trans-netunianos (TNOs)
 - Cometas
 - Meteoros
 - Planetas anões (?)

Por que estudar pequenos corpos?

- Remanescentes da formação do Sistema Solar
- Preservam informação sobre as condições do ambiente em que se formaram
 - Propriedades químicas da nebulosa protoplanetária
 - Evolução dinâmica primordial do sistema solar
- Importância das colisões no Sistema Solar
 - Riscos para a vida na Terra
 - Estratégias de defesa planetária

Grupo de Ciências Planetárias



Daniela Lazzaro



Fernando Roig



Jorge Carvano



Mário De Prá



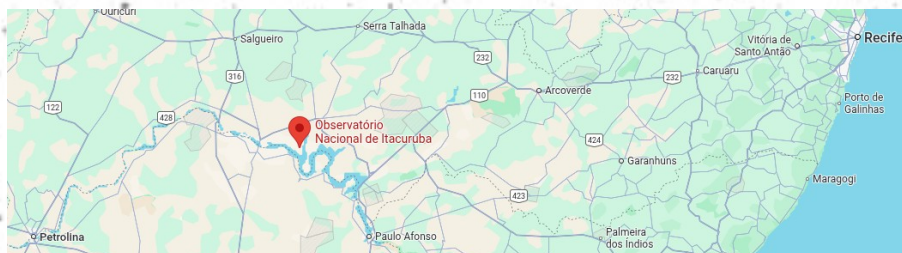
Gustavo Madeira

Grupo de Ciências Planetárias

- Colaboradores
 - Teresinha Rodrigues
- Técnicos
 - Roberto Pereira e Souza
- Pós-doutorandos
 - Eduardo Rondón
 - Plícida Arcoverde
 - Jonatan Michimani García
 - Marçal Evangelista Santana
 - Bruno Chagas
- Doutorandos
 - José Wesley Pereira da Silva
 - Marco Petersem Domingues
 - Eddie William Pinto
 - Rodolpho Degen
- Mestrandos
 - Rodrigo Oliveira
 - Cilio Marques Santos
 - Tatiane Silva

Grupo de Ciências Planetárias

- OASI – Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica



- IMPACTON – Iniciativa de Mapeamento e Pesquisa de Asteroides nas Cercanias da Terra do Observatório Nacional

Objetivos da primeira parte

- Apresentar os principais tipos de pequenos corpos do Sistema Solar.
- Discutir os aspectos dinâmicos que governam suas órbitas.
- Explorar os efeitos gravitacionais e não gravitacionais em suas trajetórias.
- Entender o papel desses corpos na história do Sistema Solar.

Por que estudar a dinâmica?

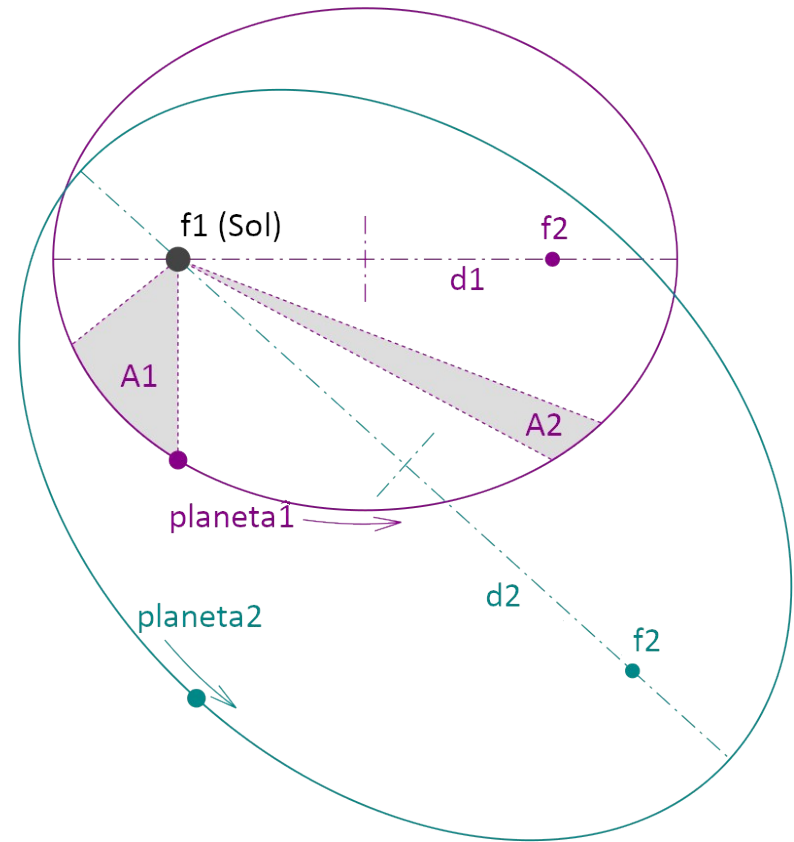
- Estudar a dinâmica dos pequenos corpos tem três propósitos:
 - Conhecendo o estado (posição e velocidade) do corpo, conseguir determinar onde ele esteve no passado e onde estará no futuro
 - Entender como as órbitas evoluem com o tempo e tentar inferir, a partir disso, as possíveis origens desses corpos
 - Entender como a distribuição orbital atual pode restringir os modelos de formação e evolução do Sistema Solar

Como estudar a dinâmica?

- Ferramentas analíticas
 - Modelos matemáticos
 - Equações diferenciais, mecânica clássica e relativística, mecânica hamiltoniana, etc.
 - Resultados universais, mas aplicação limitada
- Ferramentas numéricas
 - Algoritmos de N corpos, algoritmos hidrodinâmicos
 - Programação, paralelização, uso de HPC
 - Aplicação ilimitada, mas resultados particulares

Como estudar a dinâmica?

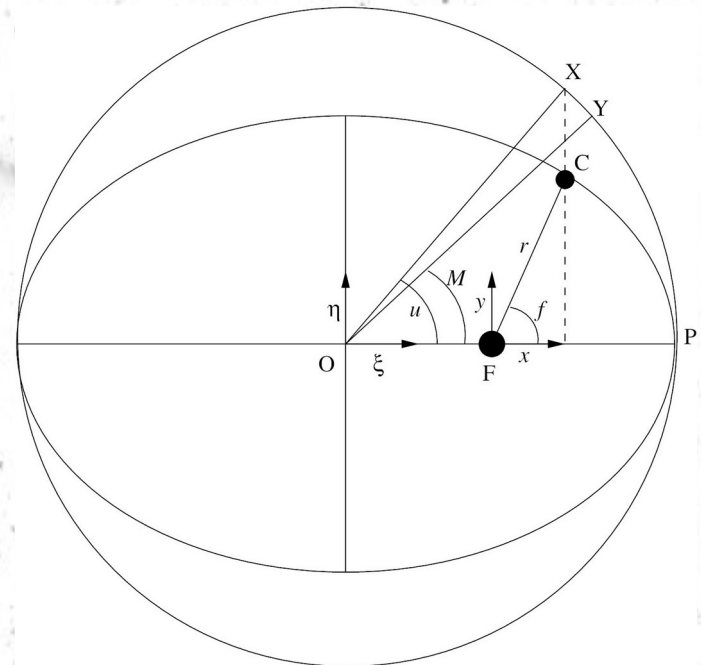
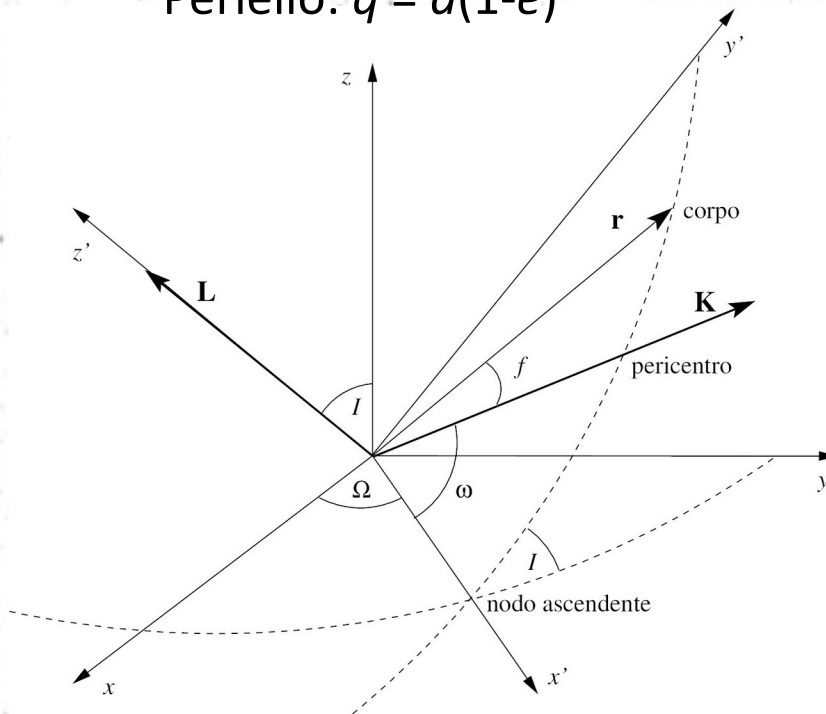
- Princípios básicos
 - Lei da gravitação de Newton
 - Leis de Kepler
 - Evolução seguindo órbitas keplerianas perturbadas



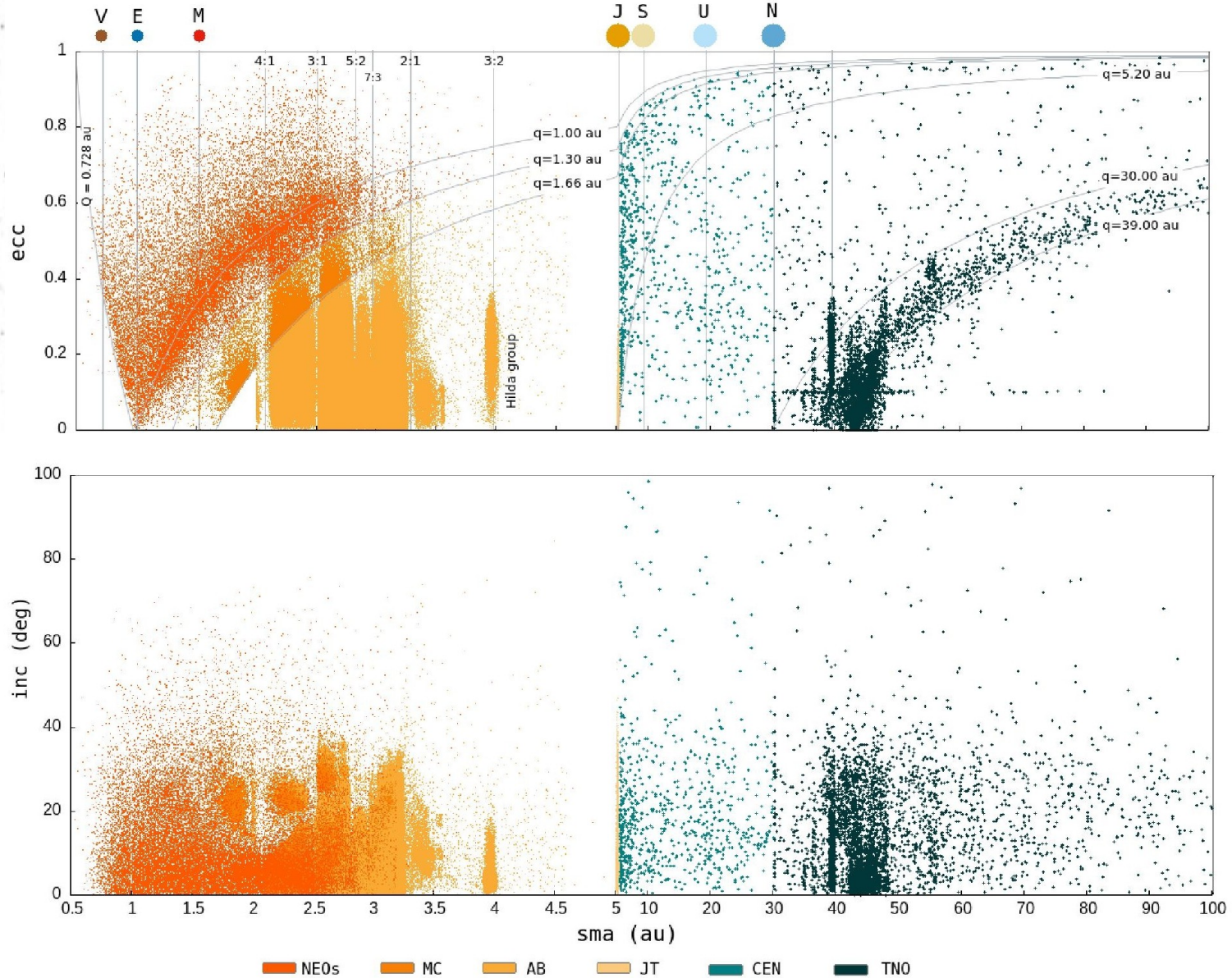
Como estudar a dinâmica?

- Elementos orbitais

- Semieixo maior: a
- Excentricidade: e
- Inclinação: I
- Periélio: $q = a(1-e)$
- Anomalia verdadeira e média: f, M
- Argumento de periélio: ω
- Longitude de nodo ascendente: Ω
- Afélio: $Q = a(1+e)$

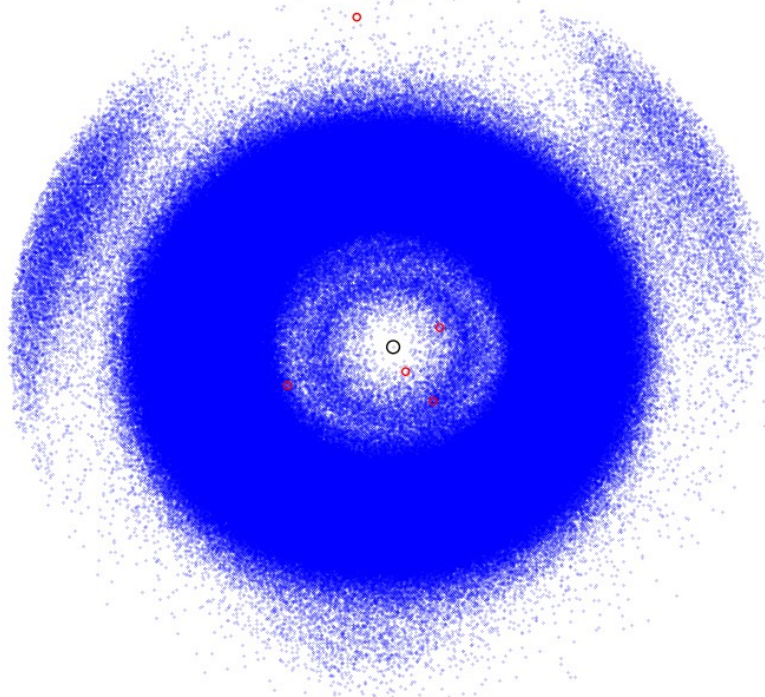


Um panorama geral

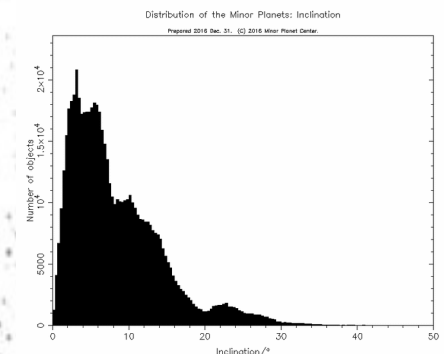
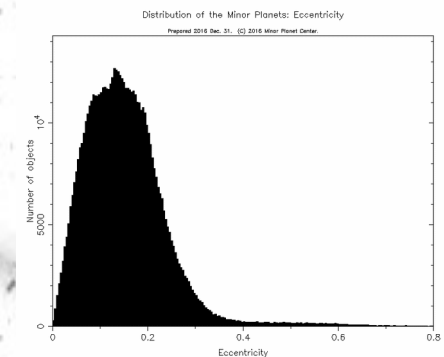
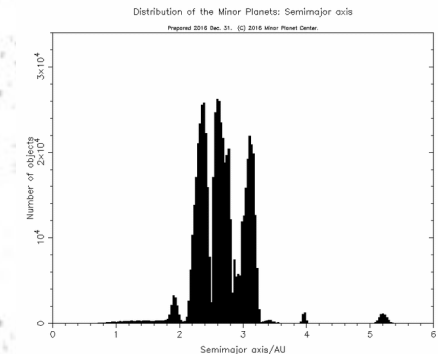


Asteroides

- Localizados majoritariamente entre as órbitas de Marte e Júpiter (Cinturão)
- Mais de 1,35 milhões conhecidos



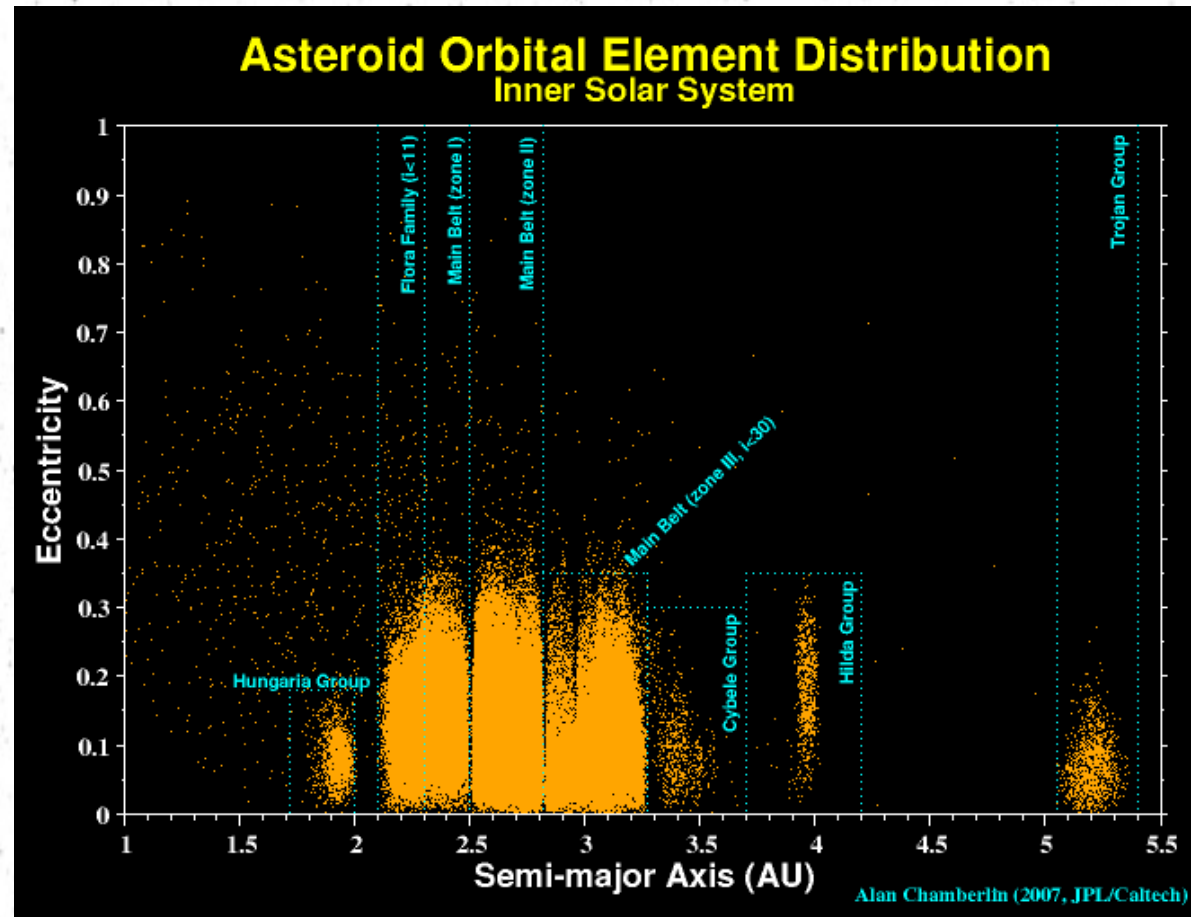
Minor planets within 5.5 AU of the Sun on 2025-07-27



Asteroides

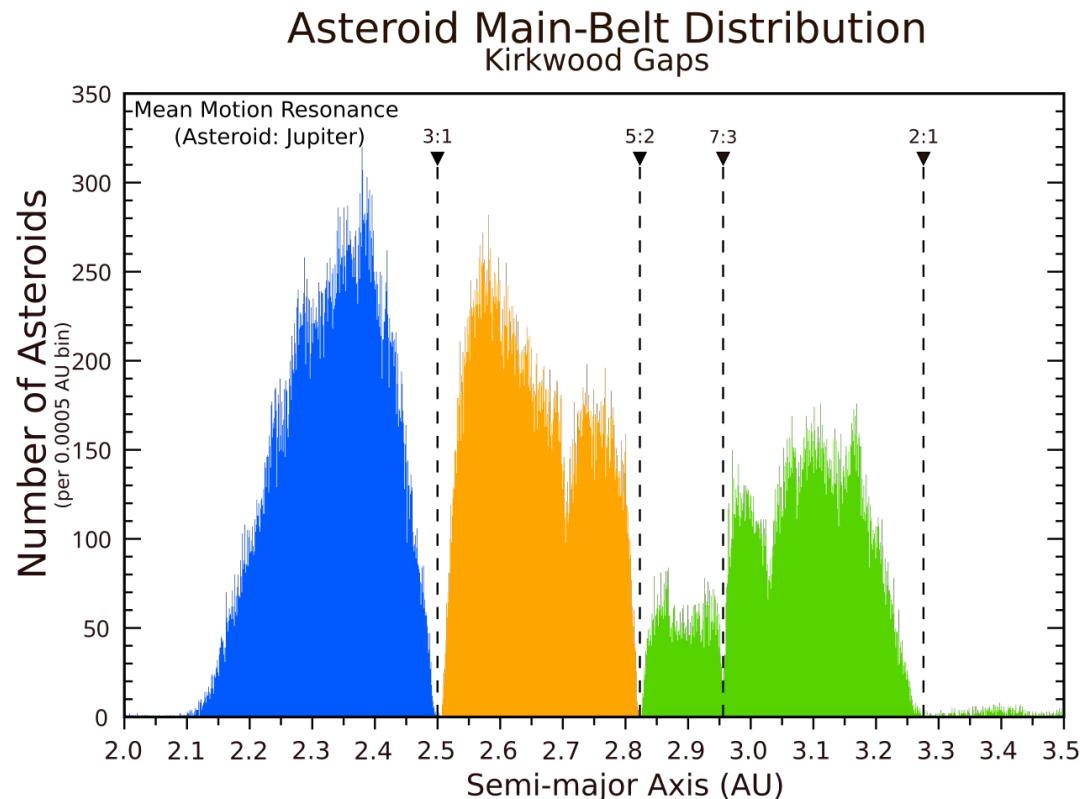
- Diferentes grupos dentro do Cinturão de Asteroides

- Cinturão Interno
 - Interno
 - Intermediário
 - Externo
- Cinturão Principal
- Cinturão Externo



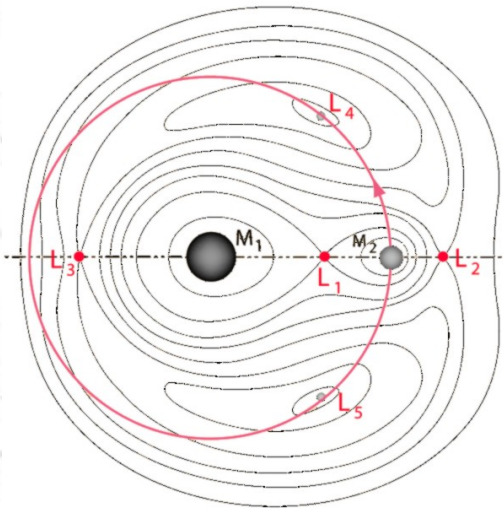
Asteroides

- Estrutura do Cinturão Principal moldada por ressonâncias com Júpiter (falhas de Kirkwood)

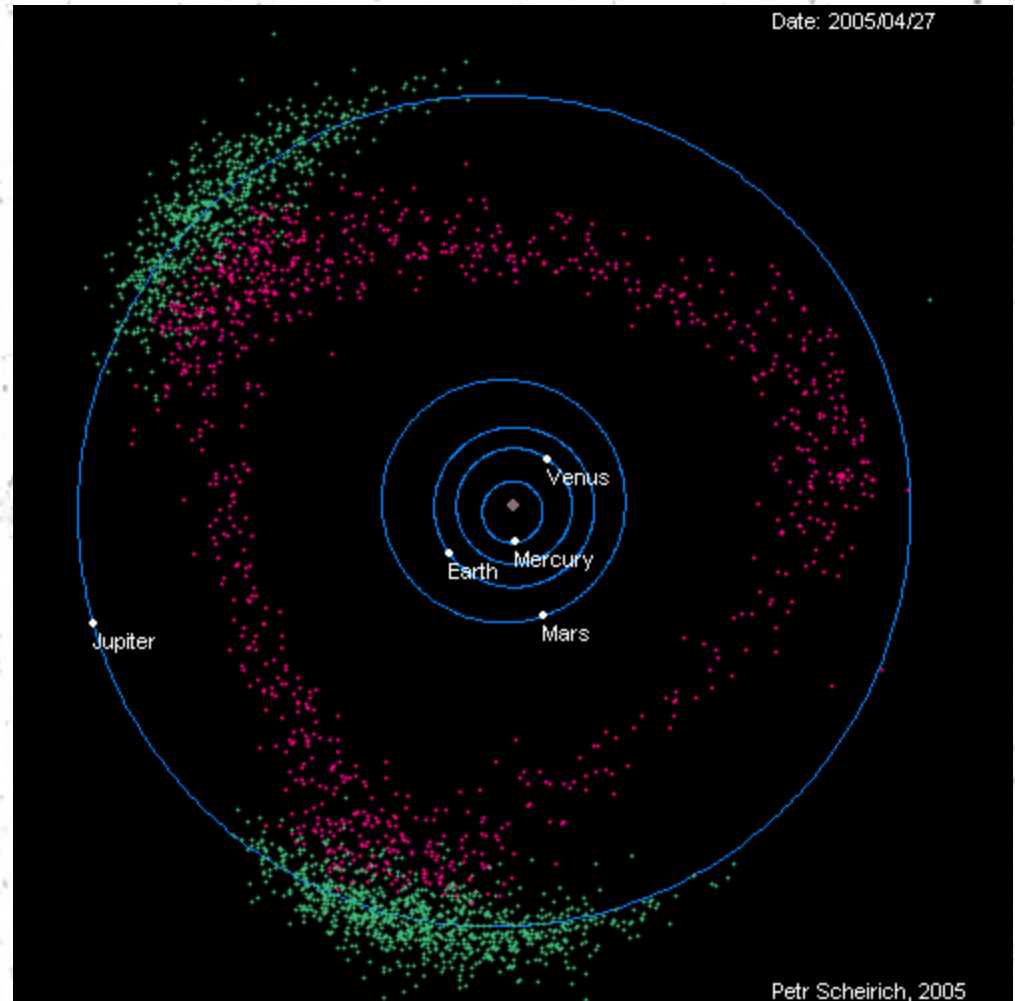


Asteroides

- Troianos de Júpiter
(16 mil objetos)

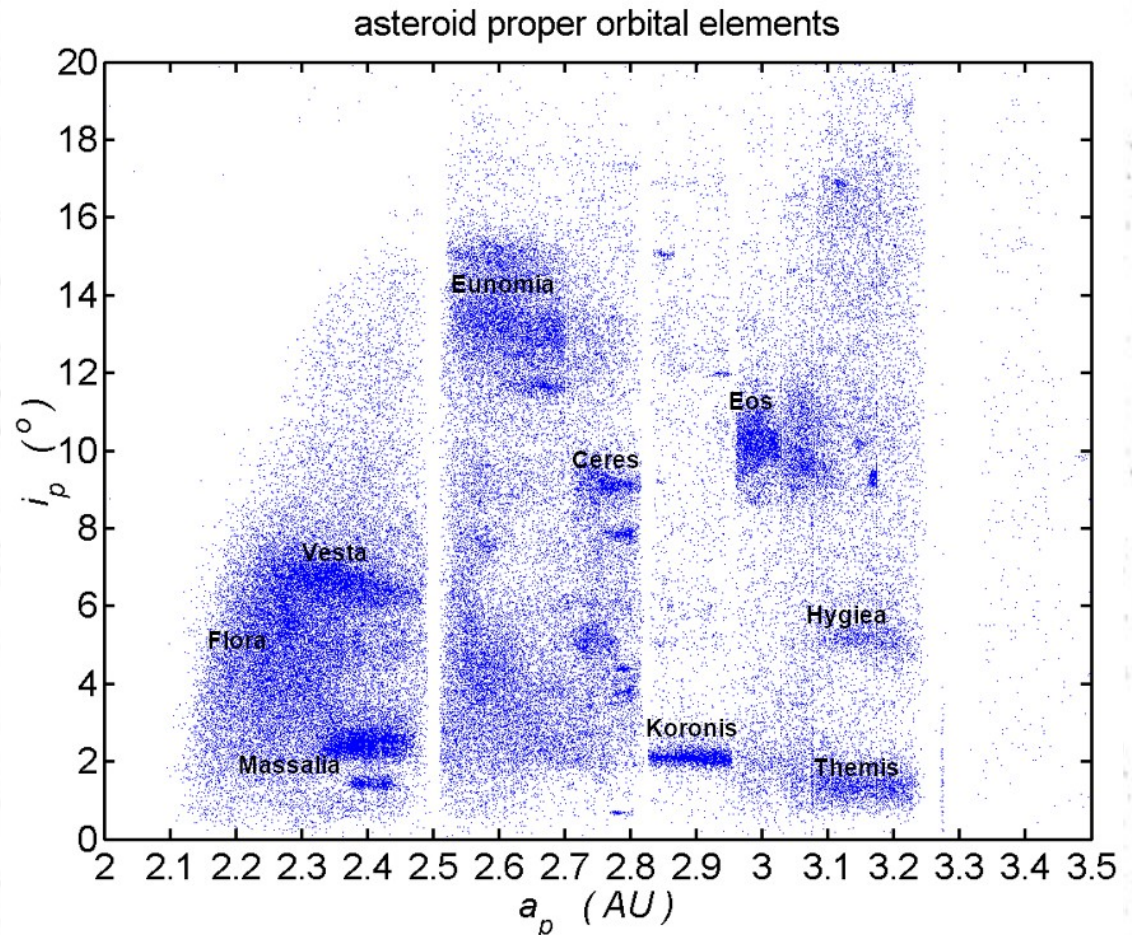
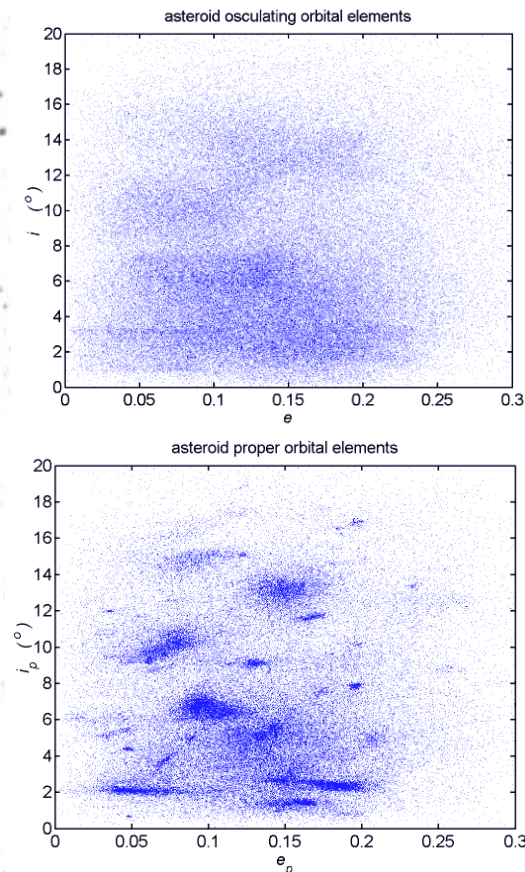


- Grupo de Hilda
(6 mil objetos)



Asteroides

- Alguns asteroides se agrupam formando famílias
- Decorrentes de colisões e fragmentações de corpos maiores



Asteroides

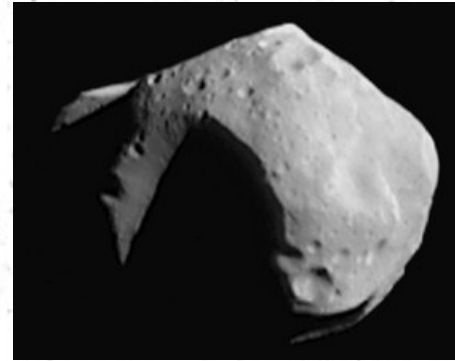
- Vários asteroides tem sido visitados por sondas espaciais



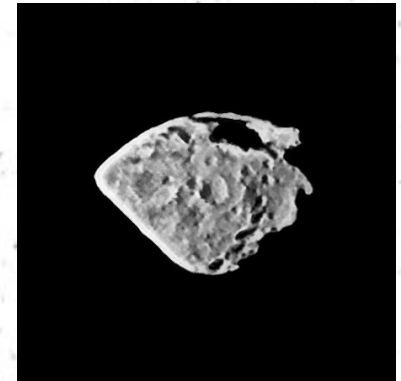
951 Gaspra
(Galileo 1991)



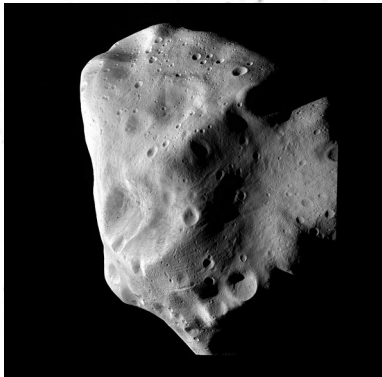
243 Ida + Dactyl
(Galileo 1993)



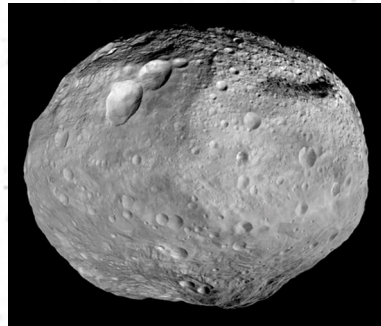
253 Mathilde
(NEAR Shoemaker
1997)



2867 Šteins
(Rosetta 2008)



21 Lutetia
(Rosetta 2010)



4 Vesta
(Dawn 2011)



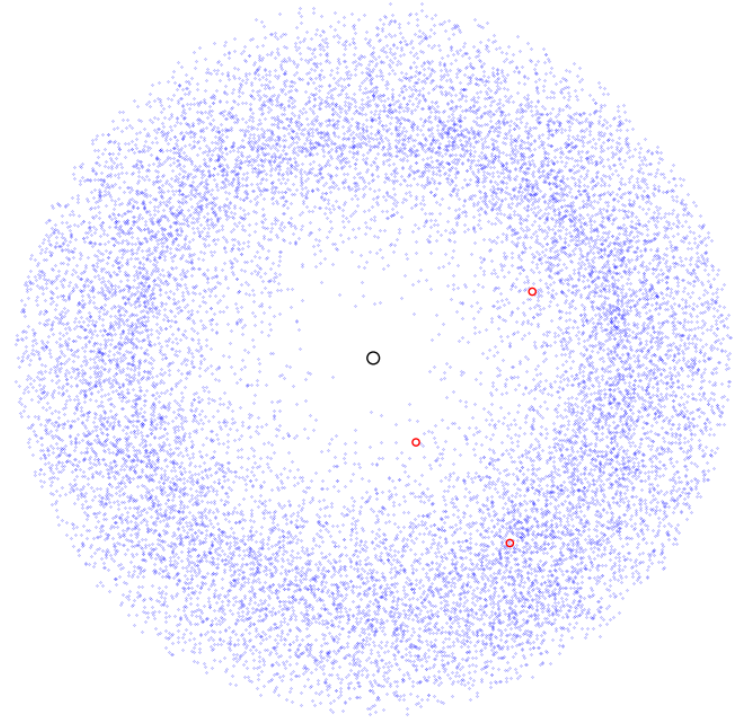
152830 Dinkinesh +
Selam (Lucy 2023)



52246 Donaldjohanson
(Lucy 2025)

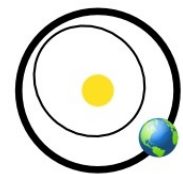
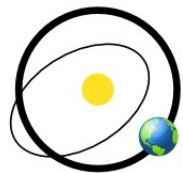
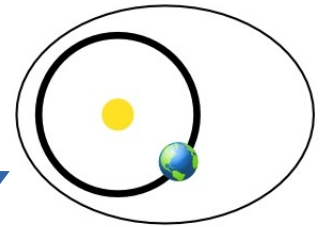
NEAs e MCs

- Cruzadores da órbita de Marte
 - Periélio q entre 1,3 e 1,67 au
 - 28 mil objetos catalogados
- Asteroides próximos da Terra
 - Periélio menor que 1,3 au
 - 39 mil objetos catalogados
- Órbitas imprevisíveis devido a sucessivos encontros próximos com os planetas terrestres



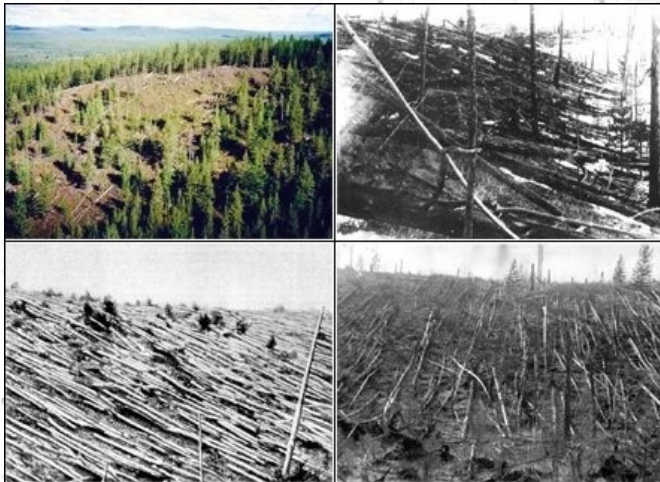
NEAs e MCs

- Diferentes subpopulações
 - Alindas: $a \approx 2,5$ au; $0,875 < q < 1,5$ au
 - Amors: $a > 1$ au; $1,017 < q < 1,3$ au
 - Apollos: $a > 1$ au; $q < 1,017$ au
 - Arjunas: $a \approx 1$ au
 - Atens: $a < 1$ au; $Q > 0,983$ au
 - Atiras: $a < 1$ au; $Q < 0,983$ au
 - Vatiras: $a < 1$ au; $Q < 0,718$ au
 - **Vulcanoides: $a < 0,387$ au**

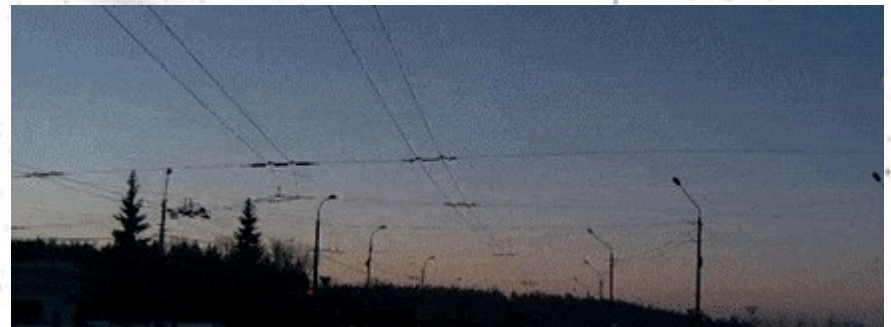


NEAs e MCs

- Populações de transição
- Tempos de vida médios entre 1 e 10 milhões de anos
- Origem no Cinturão Principal
- NEAs podem apresentar risco de colisão com a Terra (2500 objetos potencialmente perigosos)



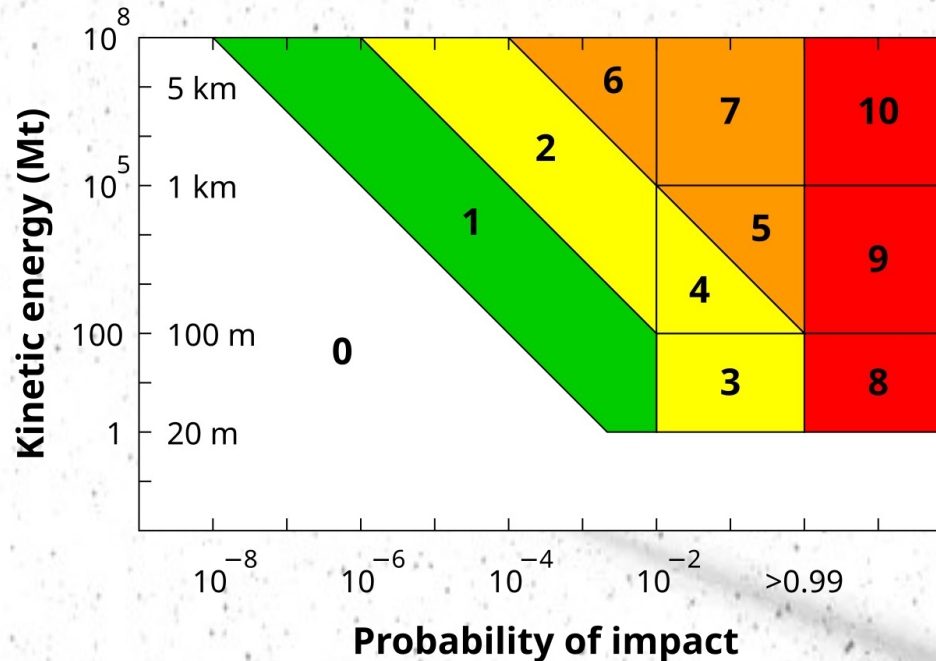
Tunguska 1908 (60 metros)



Chelyabinsk 2013 (18 metros)

NEAs e MCs

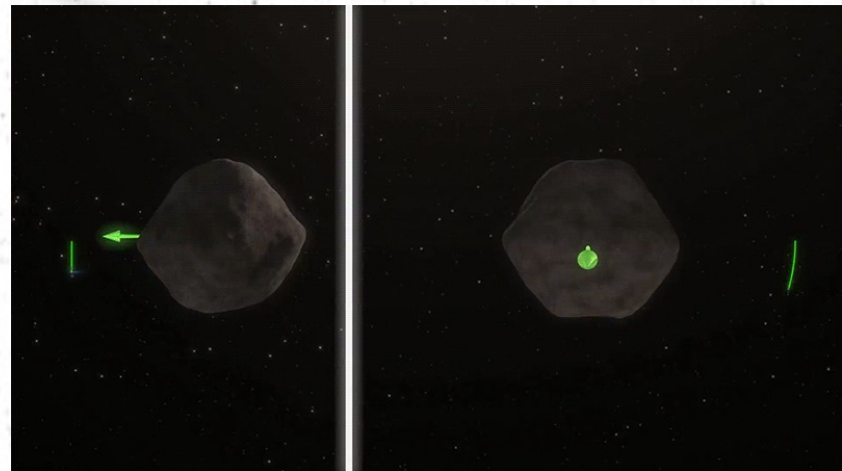
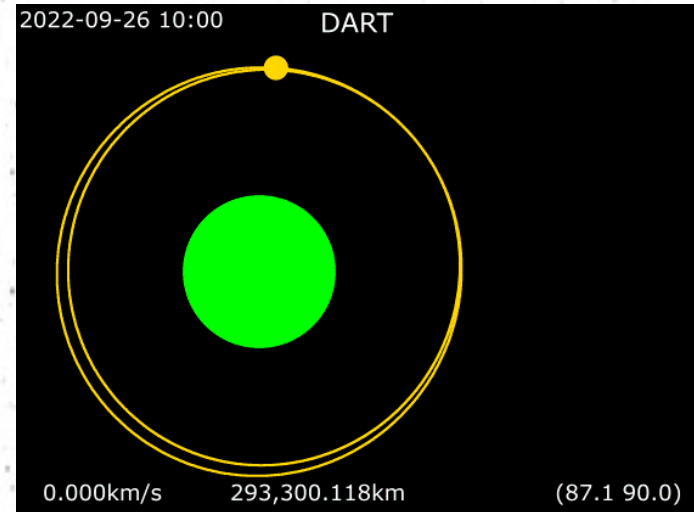
- Escala de Turim



- Necessário catalogar toda a população até tamanhos da ordem de 100 metros
- Estratégias de mitigação dependem de detecção antecipada e conhecimento das órbitas

NEAs e MCs

- Estratégias de mitigação
 - Impacto cinético: missão DART (Double Asteroid Redirection Test)
 - Trator gravitacional
 - Explosão nuclear
 - Defletor de ions
 - Ejeção de massa

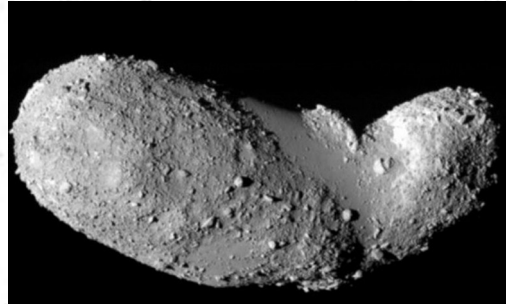


NEAs e MCs

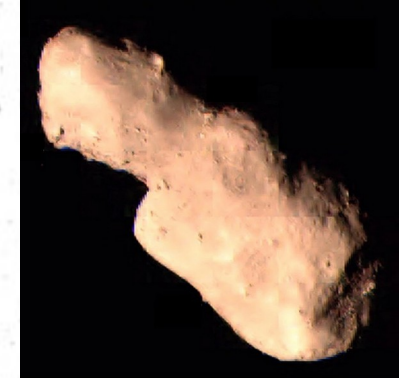
- NEAs visitados por sondas espaciais



433 Eros
(NEAR Shoemaker 1998)



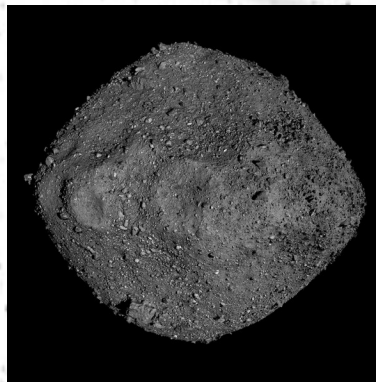
25143 Itokawa
(Hayabusa 2005)



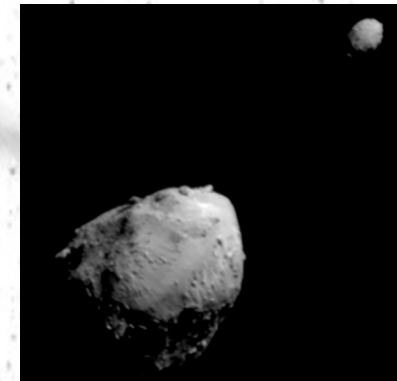
4179 Toutatis
(Chang'e2 2012)



162173 Ryugu
(Hayabusa2 2018)



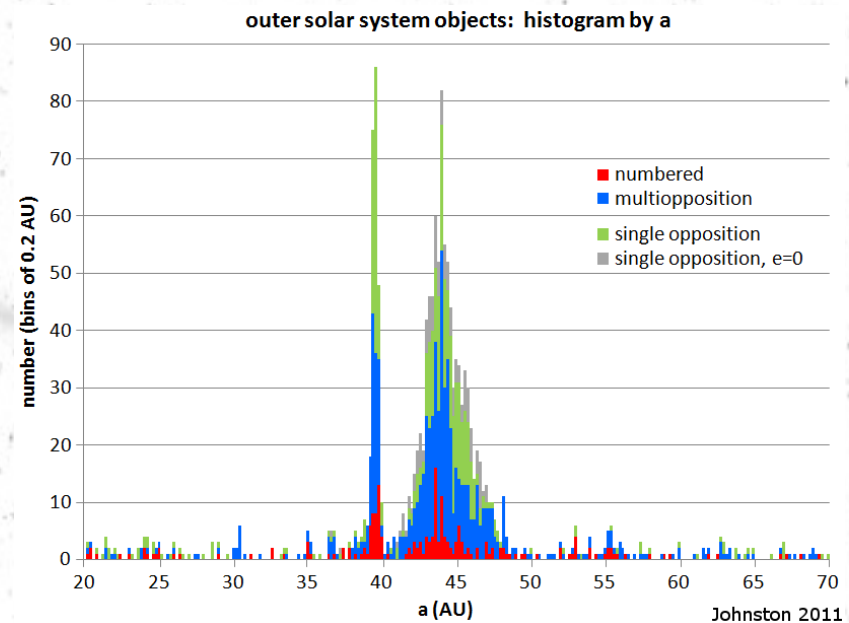
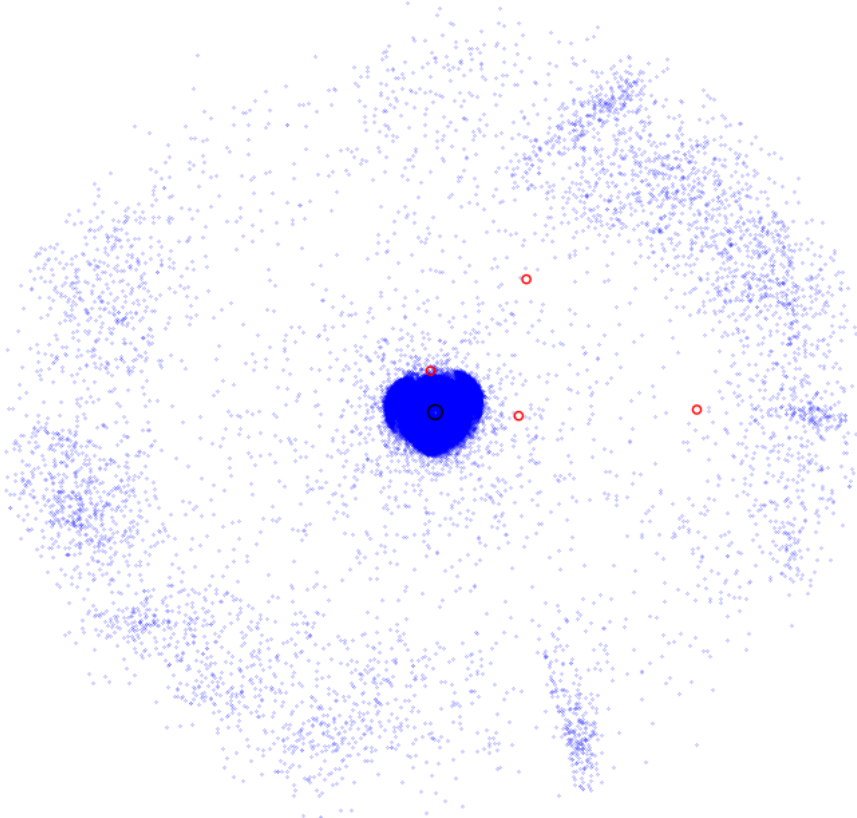
101955 Bennu
(OSIRIS-REx 2018)



65803 Didymos + Dimorphos
(DART / LICIACube 2022)

Objetos trans-netunianos (TNOs)

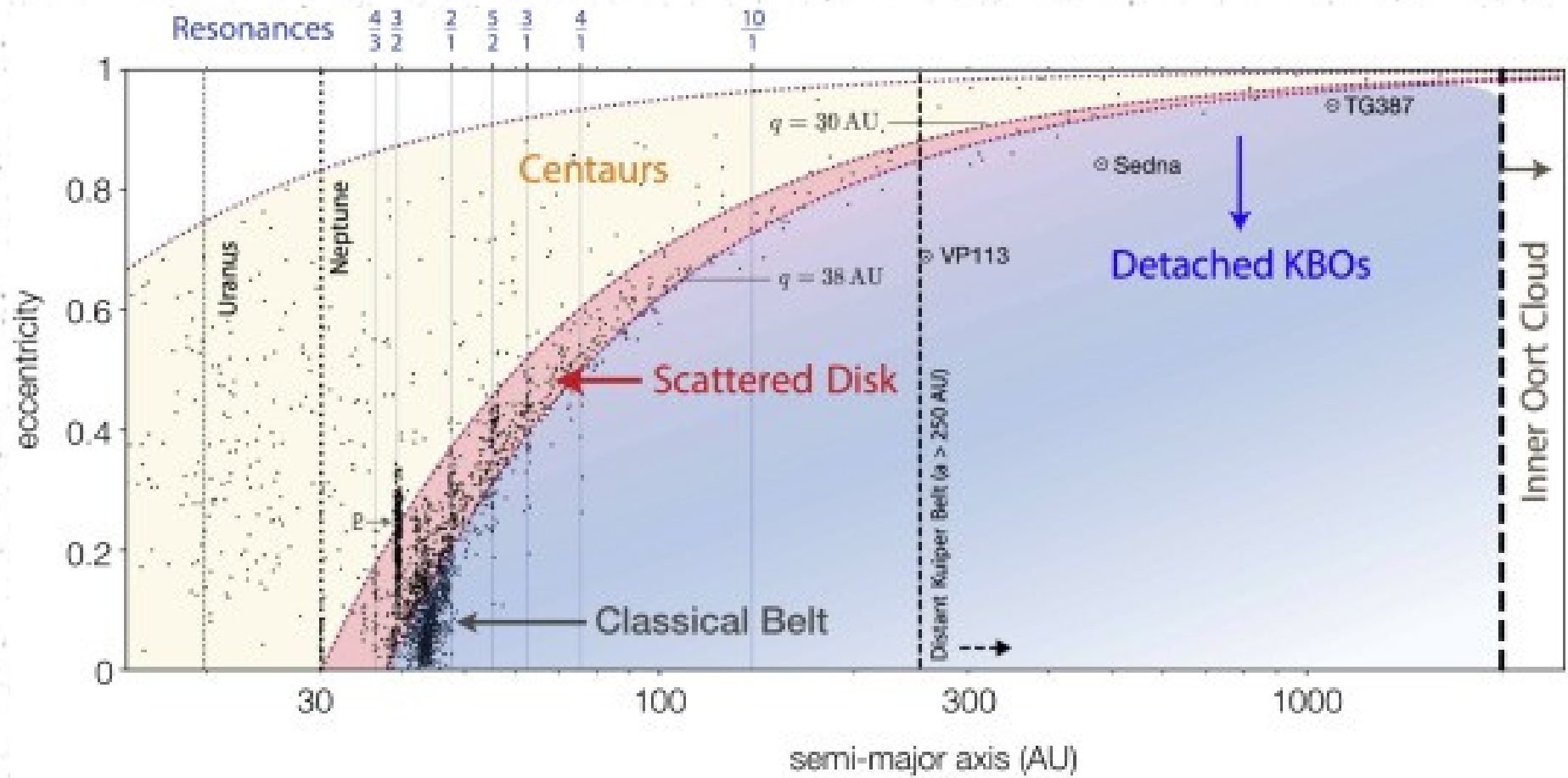
- Se agrupam majoritariamente no cinturão de Kuiper (6 mil objetos)



Objetos trans-netunianos (TNOs)

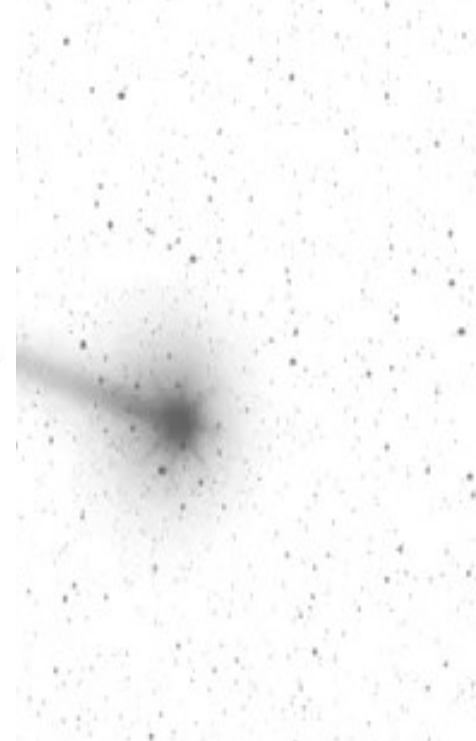
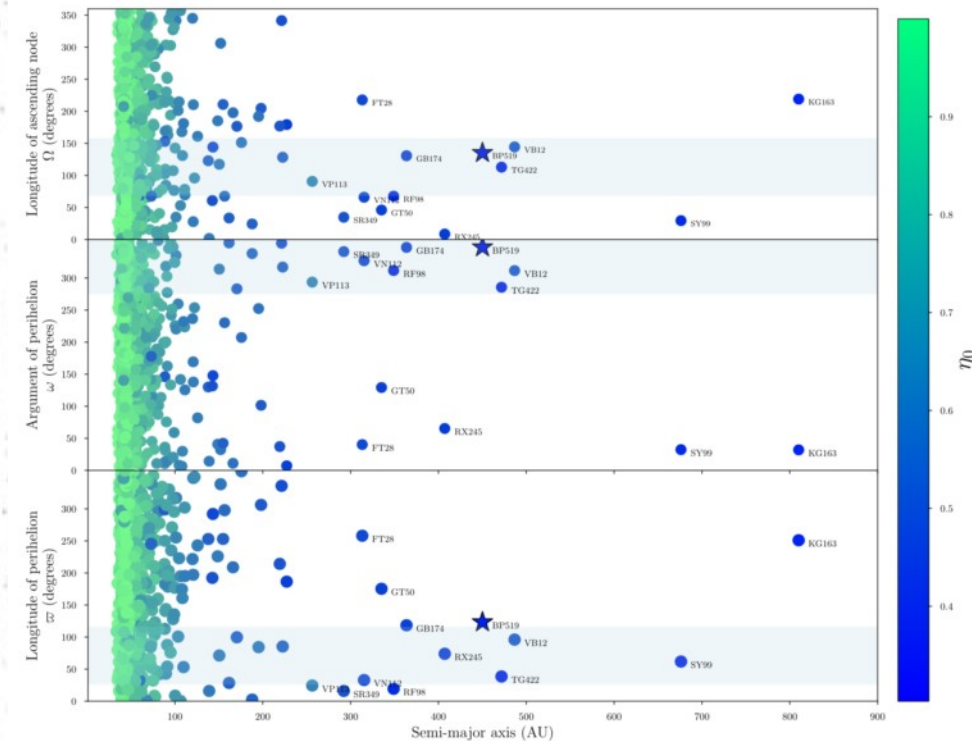
- Diferentes subpopulações
 - Plutinos: $a \approx 39$ au
 - Twotinos: $a \approx 48$ au
 - Cubewanos ou clássicos: $40 < a < 47$ au
 - Clássicos frios: $e < 0,1; i < 5^\circ$
 - Clássicos quentes: $e > 0,1; i > 5^\circ$
 - Objetos ressonantes: $35 < a < 130$ au (3:4, 3:5, 4:7, 2:5, 1:3)
 - Objetos espalhados: $a > 50$ au; $30 < q < 39$ au
 - Objetos destacados: $a > 50$ au; $39 < q < 50$ au
 - Objetos extremos: $a > 150$ au; $q > 55$ au

Objetos trans-netunianos (TNOs)



Objetos trans-netunianos (TNOs)

- Existe 1 família colisional (Haumea)
- 2 objetos possuem anéis (Haumea, Quaoar)
- Alinhamento atípico dos periélios e nodos é considerado indicativo da presença de um Planeta 9



Objetos trans-netunianos (TNOs)

- TNOs visitados por sondas espaciais



134340 Plutão
(New Horizons 2015)



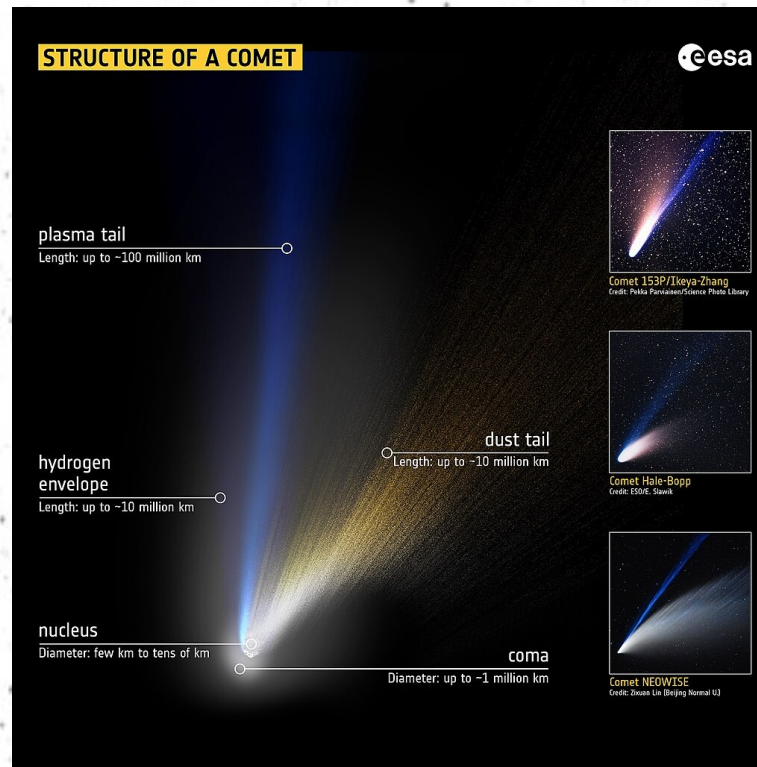
486958 Arrokoth
(New Horizons 2019)

Centauros

- Objetos localizados entre as órbitas de Júpiter e Netuno ($q > 5.2 \text{ au}$; $a < 30 \text{ au}$)
- 900 objetos
- População de transição
- Tempo de vida média de 9 milhões de anos
- Origem nos TNOs espalhados
- 2 objetos possuem anéis (Chiron, Chariklo)
- Troianos de Urano e Netuno (?)

Cometas

- Objetos que apresentam atividade (sublimação de materiais voláteis) ao se aproximar do Sol



Cometas

- Caracterizados dinamicamente pelo parâmetro de Tisserand respeito de Júpiter

$$T_J = \frac{a_J}{a} + 2 \cos I \sqrt{\frac{a}{a_J} (1 - e^2)}$$

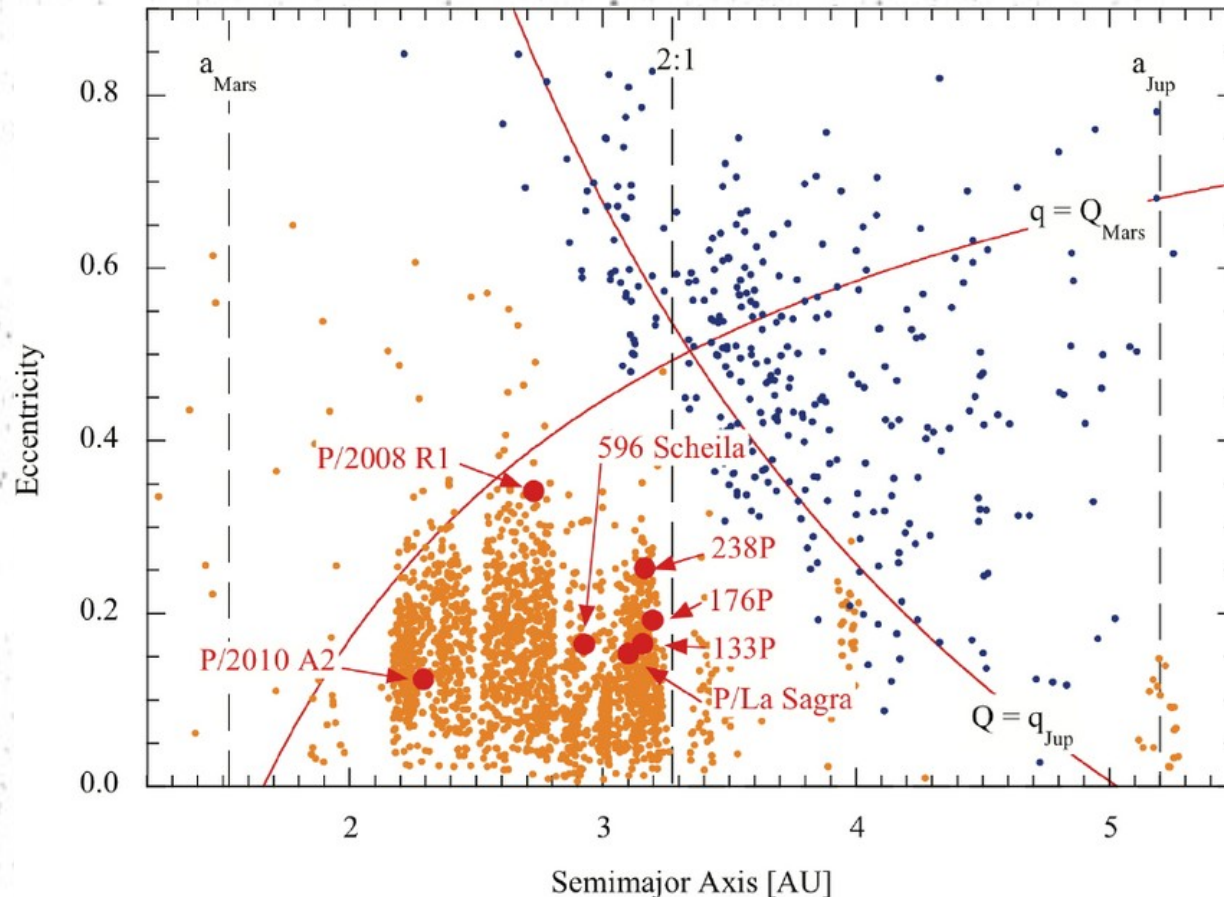
- Cometas têm $T_J < 3$ e $q < 10$ au
- Podem ser periódicos ou não periódicos
- Não periódicos são caracterizados por órbitas parabólicas ou levemente hiperbólicas ($1,0 \leq e < 1,02$)

Cometas

- Curto período: $P < 200$ anos
 - 990 objetos catalogados
 - Cometas tipo Halley: $P > 20$ anos; $0^\circ < I < 180^\circ$; $T_J < 2$
 - Cometas da Família de Júpiter (ou eclípticos): $P < 20$ anos; $I < 30^\circ$; $2 < T_J < 3$
 - Cometas tipo Encke: $Q < 5$ au
 - Cometas do Cinturão Principal (asteroides ativados): $2,1 < a < 3,2$ au; $T_J > 3$
 - Damocloides: $T_J < 2$ (sem atividade)
 - Asteroides em Órbitas Cometárias: $2,1 < a < 3,2$ au; $T_J < 3$

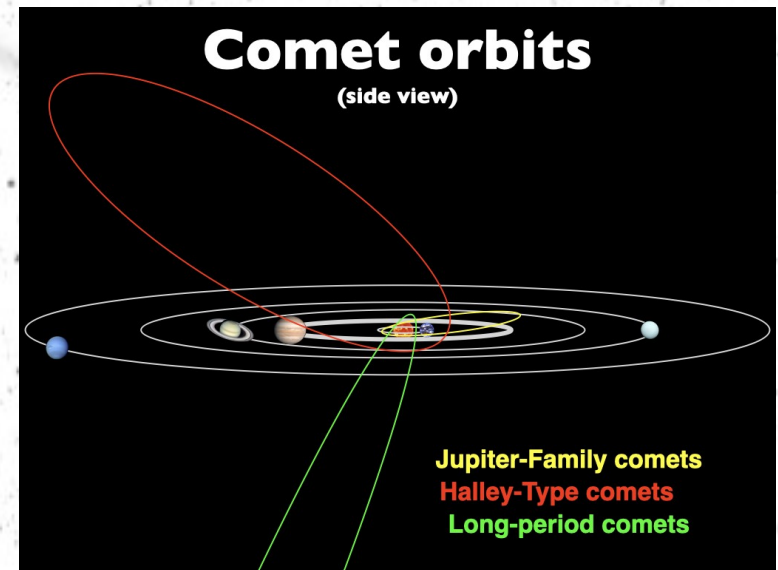
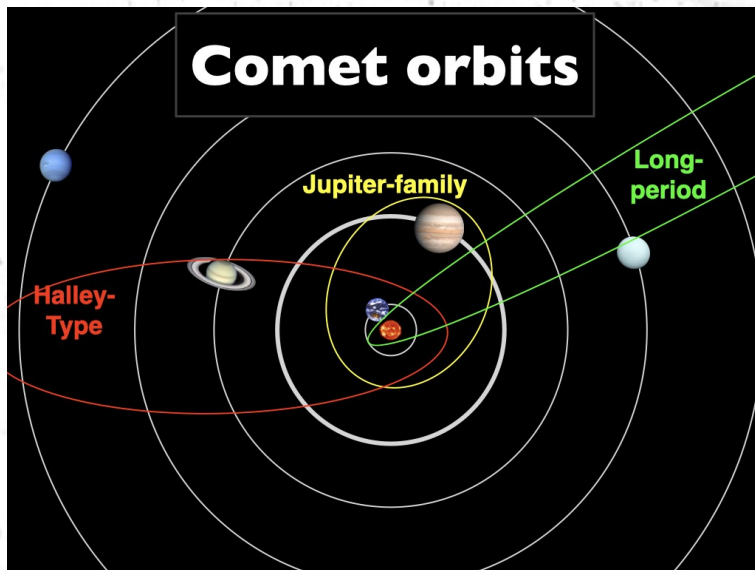
Cometas

- Cometas do Cinturão Principal



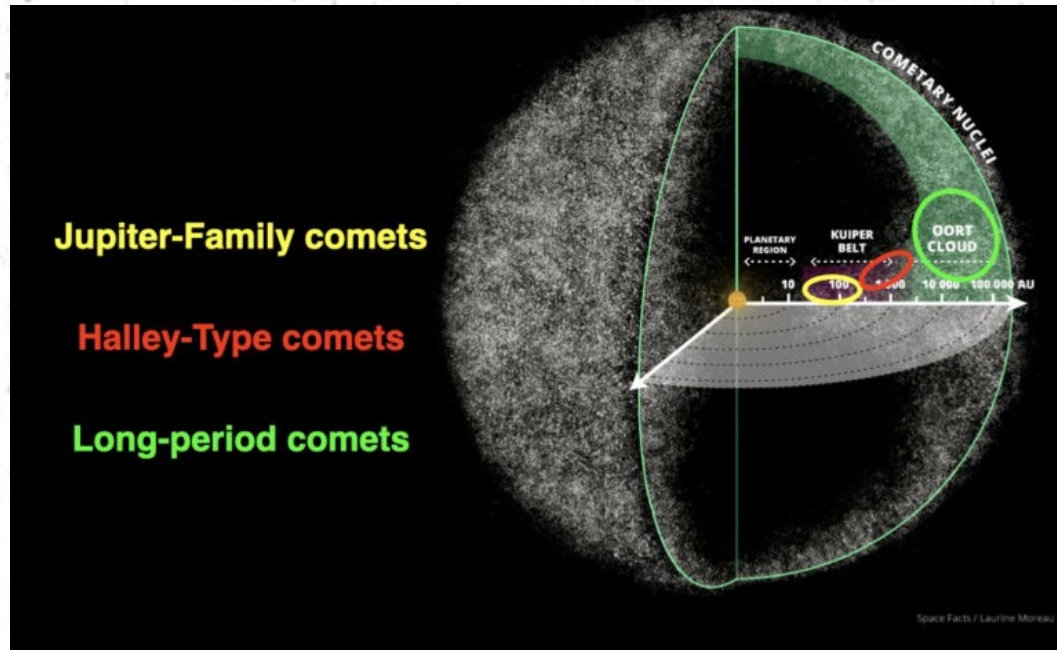
Cometas

- Longo período: $P > 200$ anos
 - Órbitas muito excêntricas: $e > 0,85$; inclinações variadas
 - Órbitas confinadas em relação ao baricentro do Sistema Solar, mesmo se $e > 1$
 - Períodos podem chegar a milhões de anos



Cometas

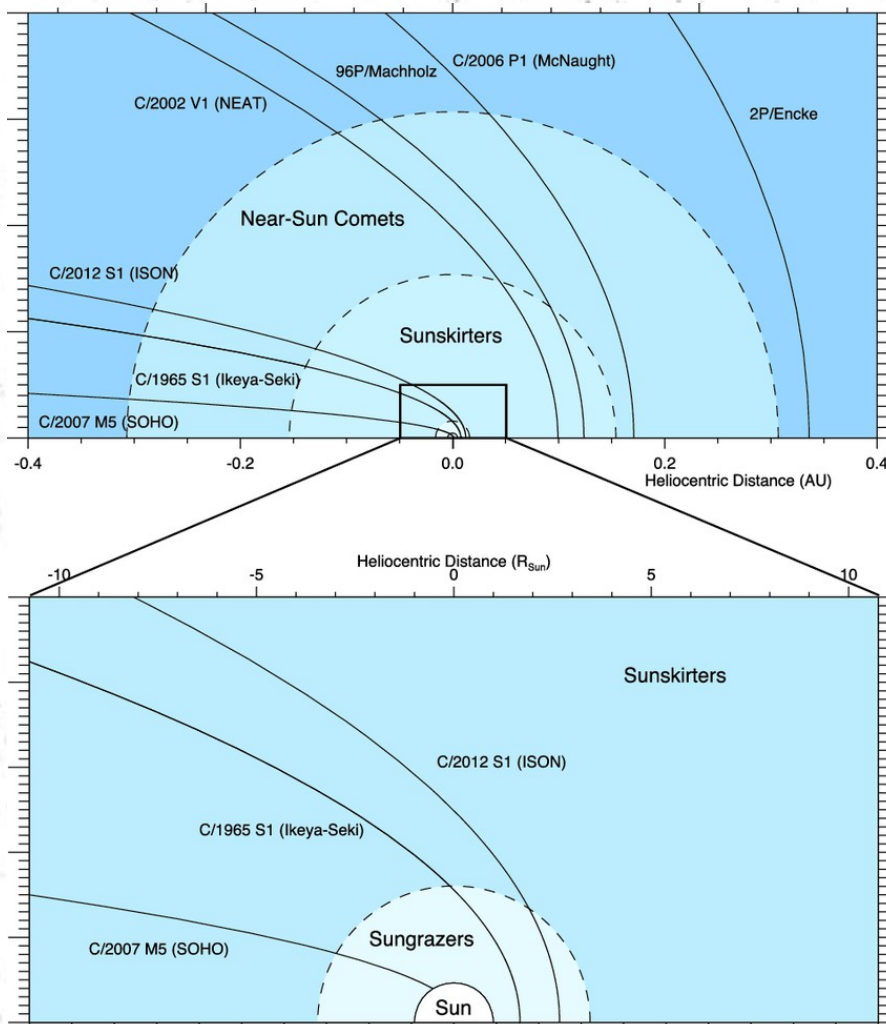
- Fontes dos cometas



- A dinâmica dos cometas é fortemente influenciada:
 - Encontros próximos com os planetas e o Sol
 - Jatos assimétricos devidos ao material sublimado (alteram a órbita e a rotação)

Cometas

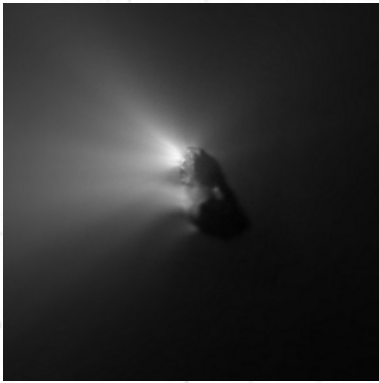
- Cometas próximos do Sol, periféricos e rasantes



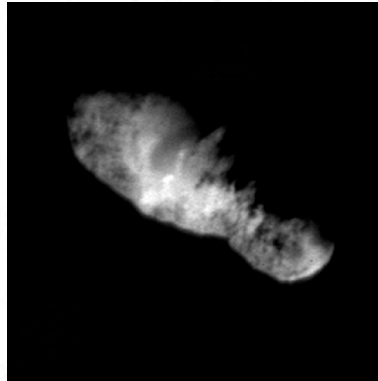
- Grupos de cometas rasantes: Kreutz, Marsden
- Originados pela quebra de um cometa gigante
- Vínculo com chuvas de meteoros

Cometas

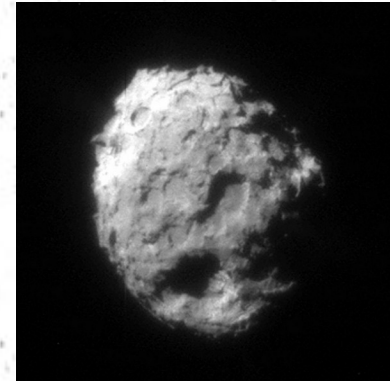
- Cometas visitados por sondas



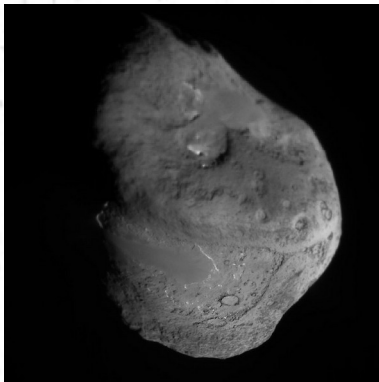
1P/Halley
(Giotto 1986)



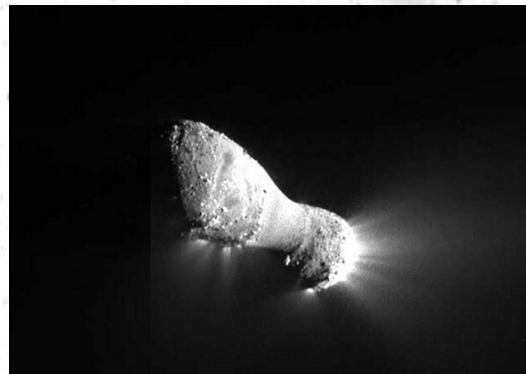
19P/Borrelly
(Deep Space 1 2001)



81P/Wild
(Stardust 2004)



9P/Tempel
(Deep Impact 2005)



103P/Hartley
(EPOXI 2010)



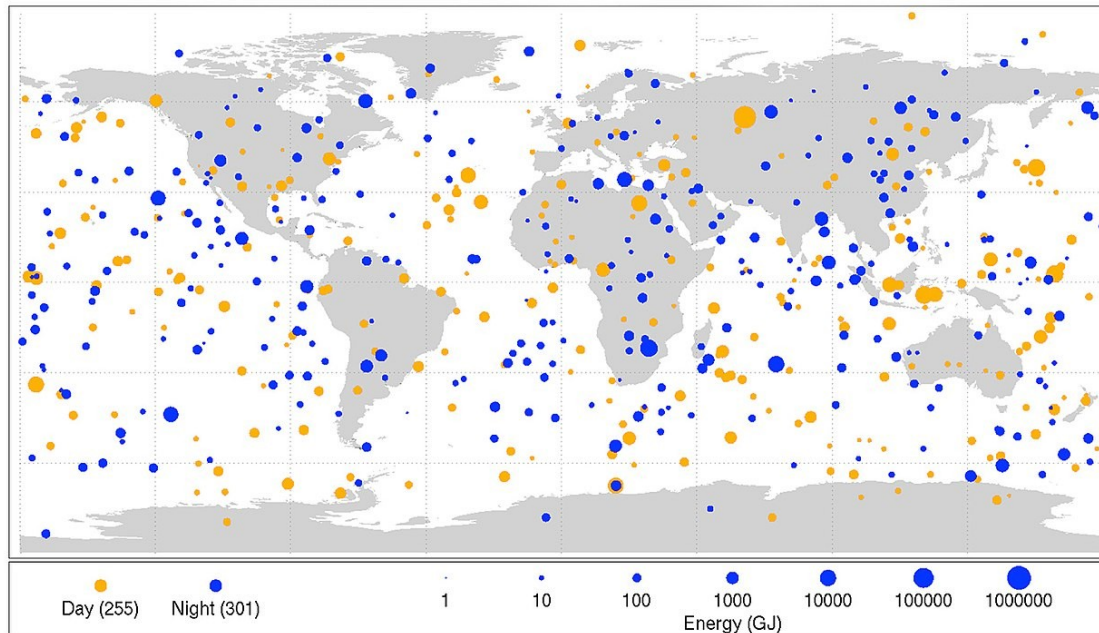
67P/Churyumov-Gerasimenko
(Rosetta/Philae 2014)

Meteoros e meteoroides

- Meteoros são objetos pequenos que ingressam na atmosfera Terrestre
- A maioria se desintegra antes de atingir o solo

Bolide events 1994-2013

(Small asteroids that disintegrated in the Earth's atmosphere)



Meteoros e meteoroides

- Meteoros se originam a partir de meteoroides
 - Pequenos fragmentos de asteroides
 - Correntes de meteoroides associadas a resíduos de cometas (chuvas de meteoros)



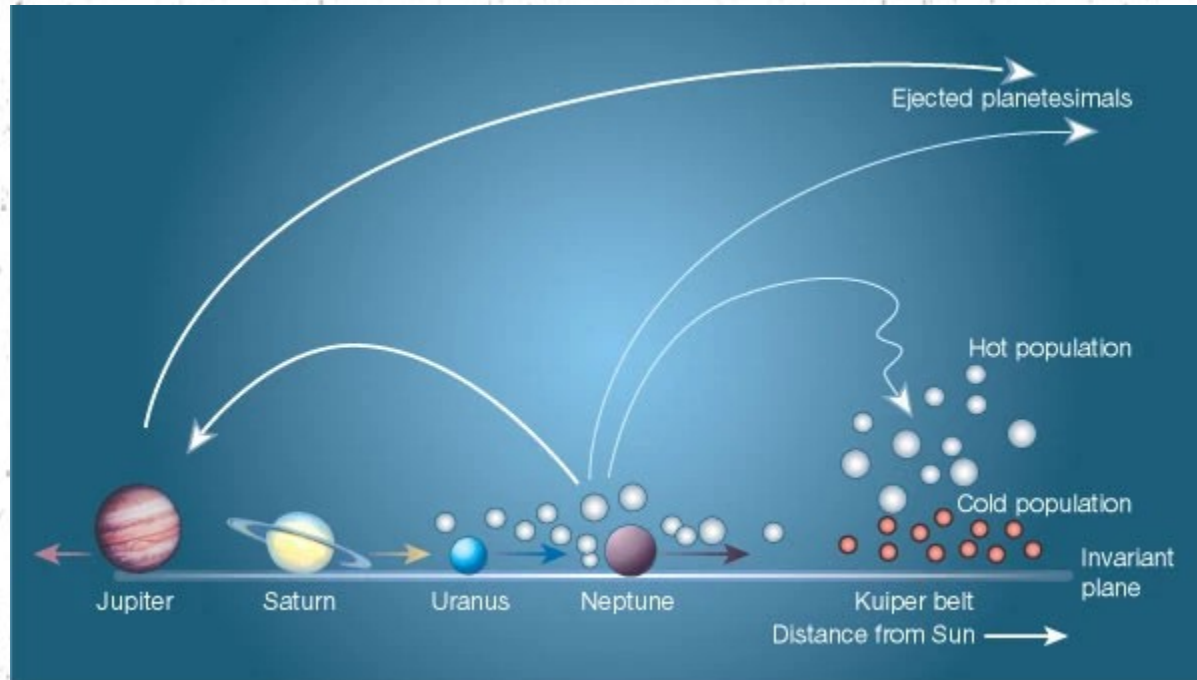
Perseidas (Julho-Agosto) – 109P/Swift-Tuttle

Origem dos pequenos corpos

- Remanescentes do disco protoplanetário que não conseguiram se aglutinar para formar planetas
- Origem primordial fortemente influenciada pela migração radial dos planetas gigantes
 - Depleção do Cinturão de Asteroides
 - Dispersão e configuração do Cinturão de Kuiper
 - Capturas em ressonância
 - Origem da nuvem de Oort

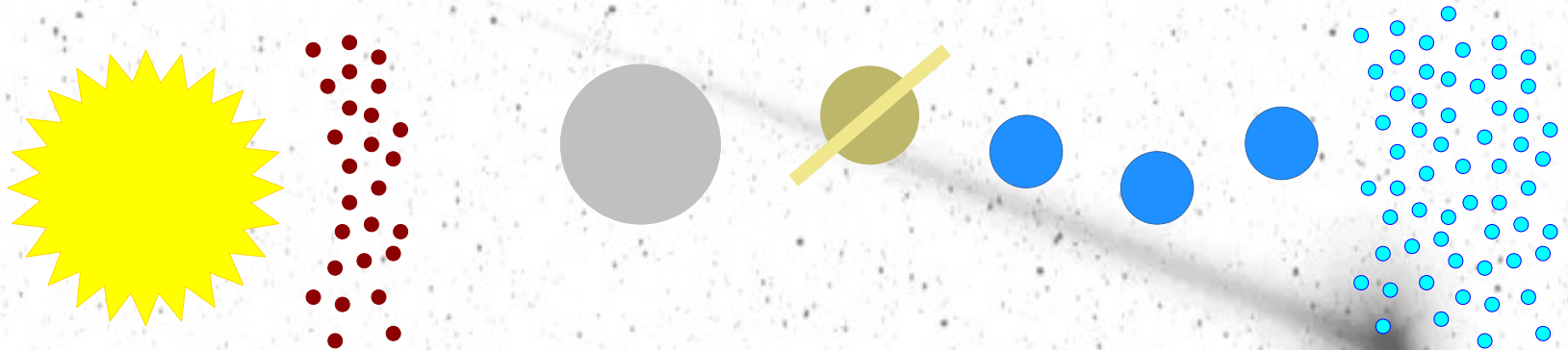
Modelo de Nice

- Migração dos planetas gigantes causada por interação com um disco de planetesimais
 - Encontros com os planetesimais transferem momento angular
 - Júpiter migra para dentro e os demais planetas para fora



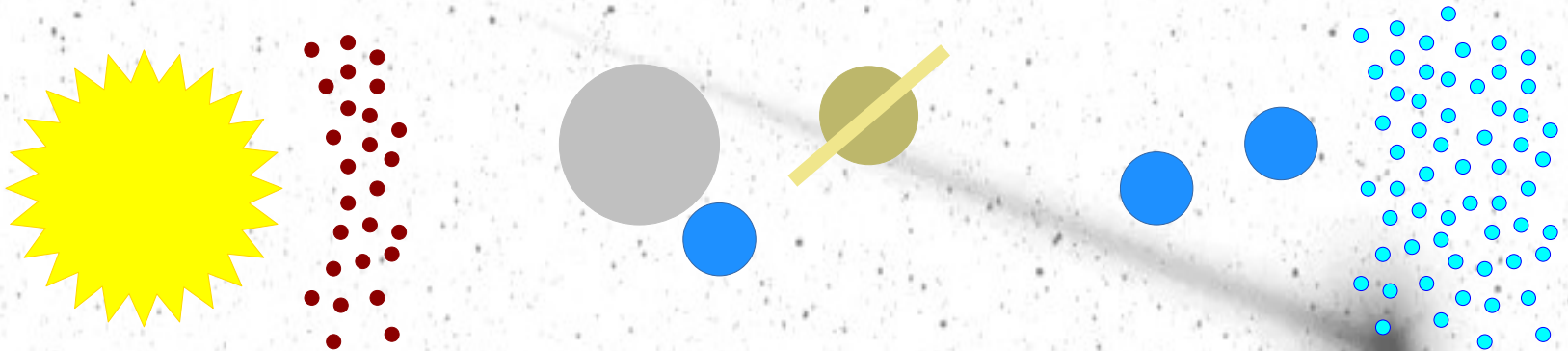
Modelo de Nice

- Inicialmente 5 planetas gigantes
- 1 é ejetado → instabilidade dinâmica (Júpiter saltitante)



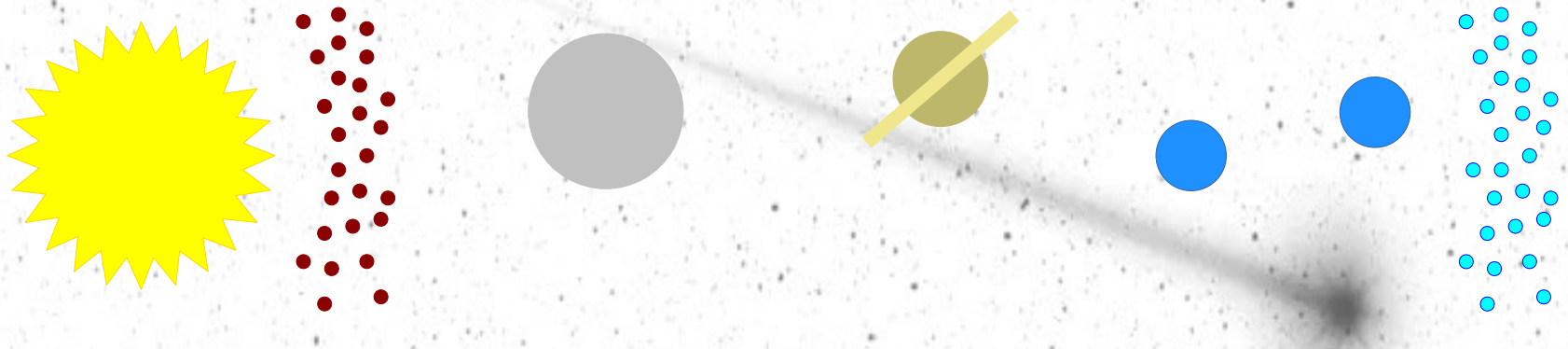
Modelo de Nice

- Inicialmente 5 planetas gigantes
- 1 é ejetado → instabilidade dinâmica (Júpiter saltitante)



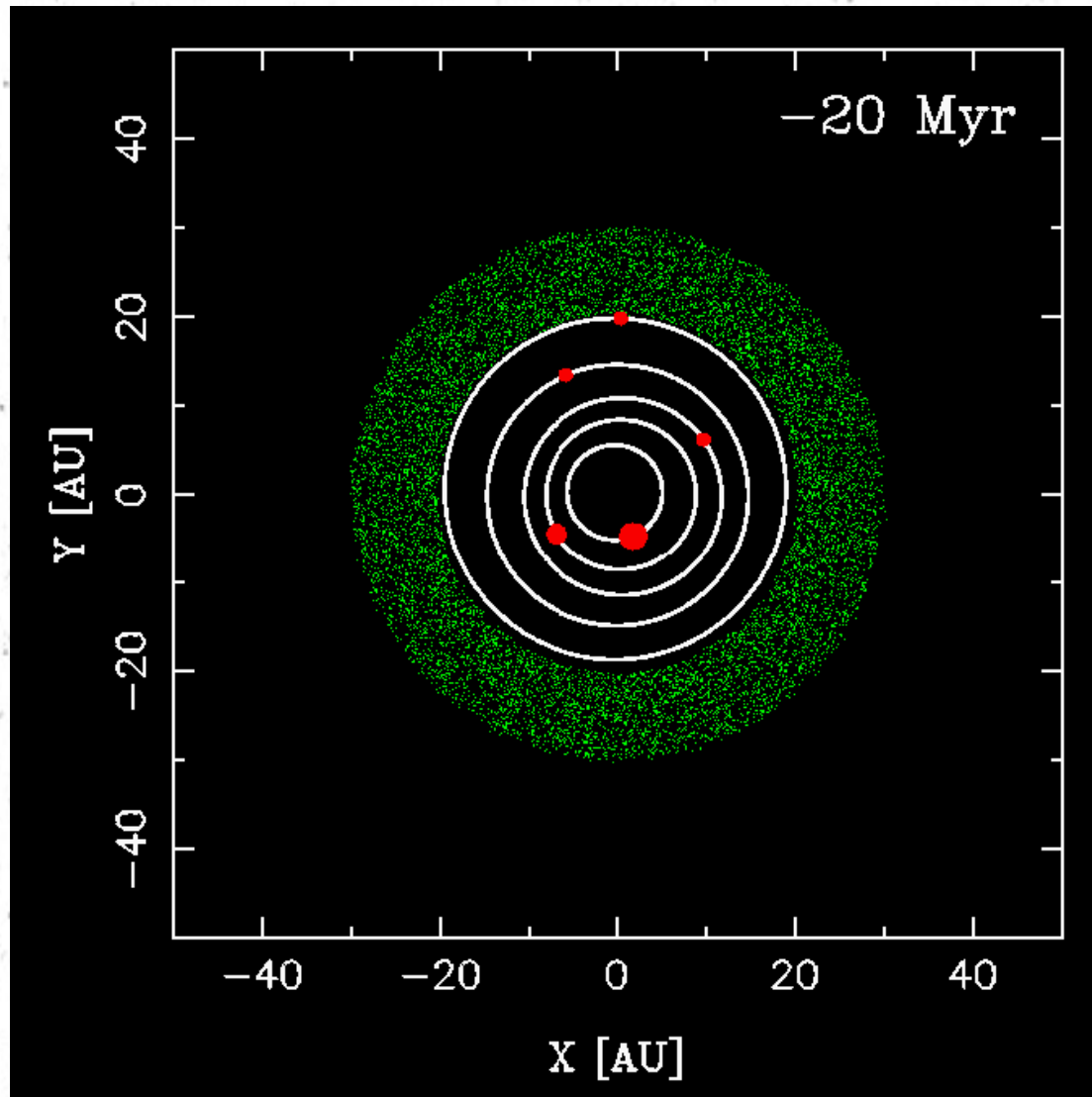
Modelo de Nice

- Inicialmente 5 planetas gigantes
- 1 é ejetado → instabilidade dinâmica (Júpiter saltitante)



A fase de instabilidade dura algumas centenas de milhares de anos

Modelo de Nice



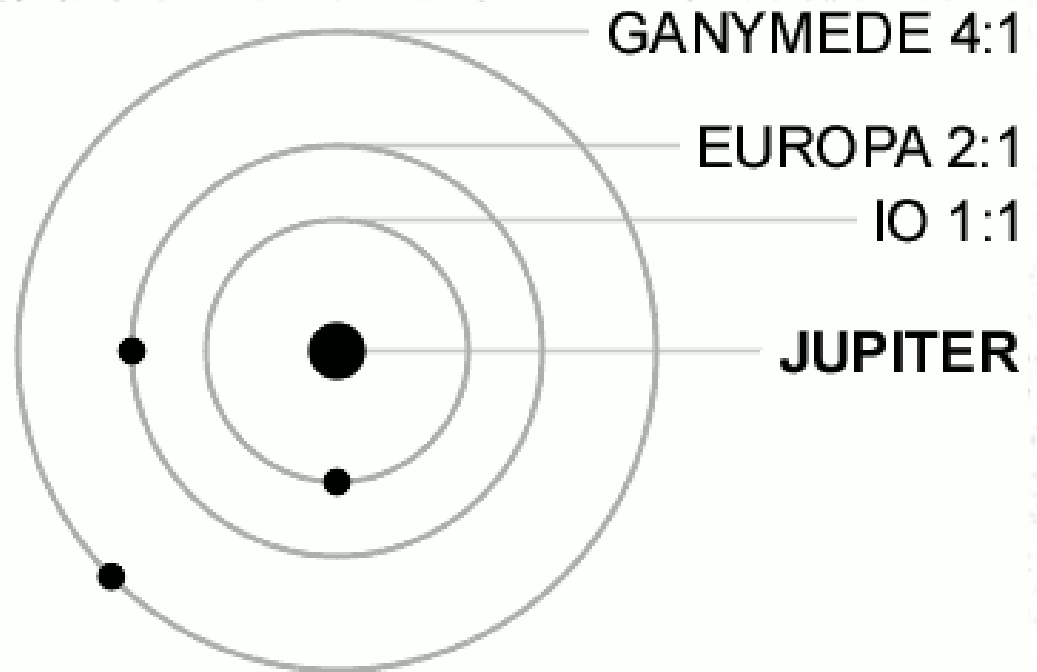
Evolução subsequente

- Ressonâncias
- Ocorrem quando dois corpos têm períodos orbitais cuja razão é uma fração

$$\frac{P_1}{P_2} \approx \frac{p}{q}$$

p e q inteiros

Ressonância $p:q$

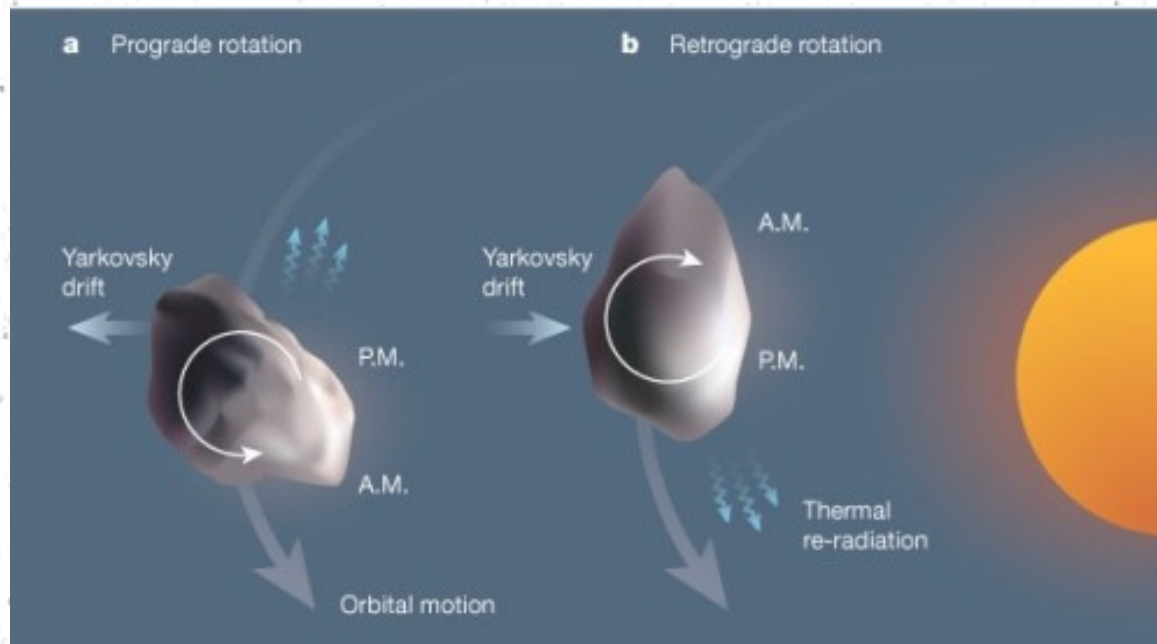


Evolução subsequente

- Ressonâncias podem gerar instabilidade (falhas de Kirkwood) ou estabilidade (Hildas, TNOs ressonantes, Troianos)
- Pequenos corpos em ressonância evitam colisões com o planeta ressonante
- Ressonâncias aumentam a excentricidade das órbitas → rotas de transferência entre diferentes regiões
 - Exemplo: 4179 Toutatis na ressonância 3:1

Evolução subsequente

- Efeitos Yarkovsky e YORP
- Efeitos não gravitacionais causados pela reemissão térmica de corpos sem atmosfera



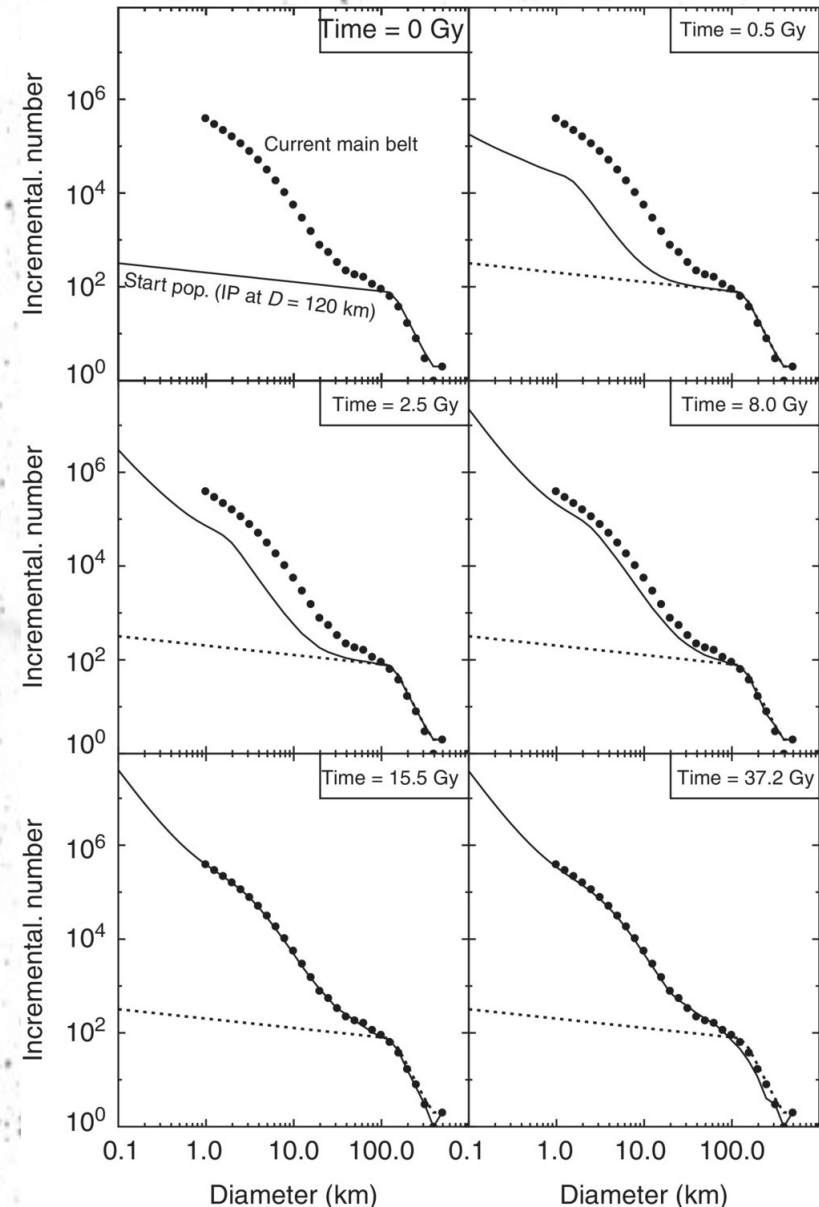
- Dependem do tamanho, rotação e forma

Evolução subsequente

- Yarkovsky causa migração radial lenta
 - Efeito diurno $\frac{da}{dt} \propto \frac{1}{D} \cos \varepsilon$
 - Efeito sazonal $\frac{da}{dt} \propto -\frac{1}{D} \sin^2 \varepsilon$
- YORP causa torques que modificam a obliquidade e o período de rotação
- Ambos efeitos contribuem para injetar asteroides em ressonâncias

Evolução subsequente

- Colisões
- Moldam a distribuição de tamanhos
- Formam famílias
- Geram crateras
- Criam poeira
- Permitem estabelecer vínculos com a evolução dinâmica primordial



Evolução subsequente

- Caos
- Problema de N corpos ($N > 2$) não é integrável
- Não é possível descrever uma solução válida para todo tempo e toda condição inicial
- Pequenas diferenças nas condições iniciais podem causar resultados imprevisíveis a longo prazo
- O caos pode ser fraco ou forte: depende da escala de tempo
- Sobreposição de ressonâncias gera caos

Conclusões

- Pequenos corpos preservam registros de eventos dinâmicos primordiais
- Permitem restringir modelos de formação e evolução do Sistema Solar
- Fornecem indicações de migração planetária, presença de planetas não detectados, colisões, etc.
- Relevantes para a defesa planetária