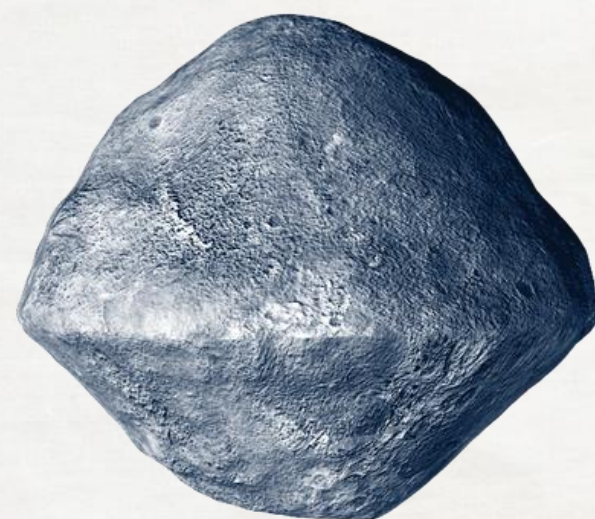


Propriedades físicas e dinâmicas de pequenos corpos do Sistema Solar

Dr. Filipe Monteiro
Observatório Nacional



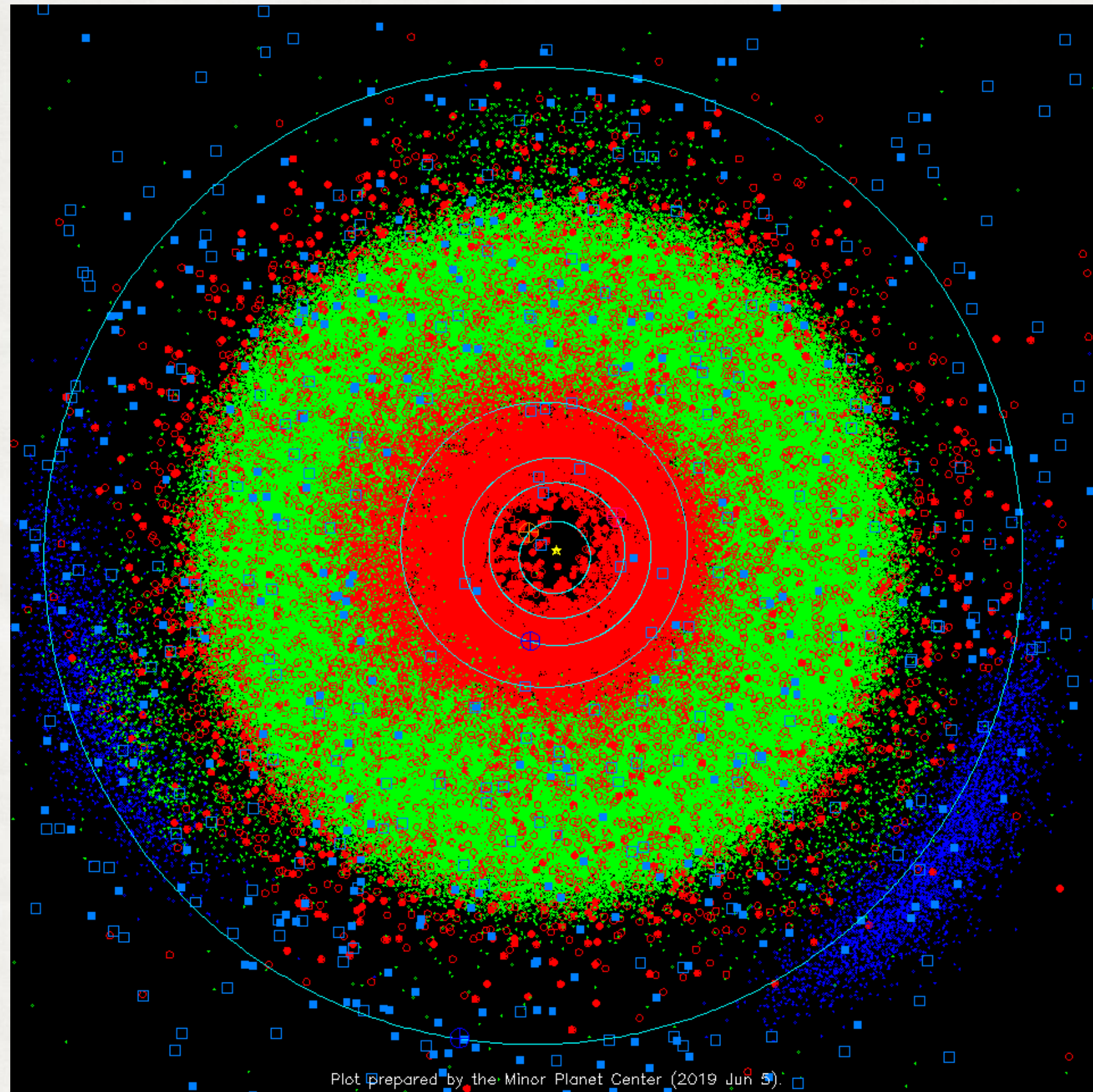
Escola de Inverno em Astrofísica 2026
20-24 de julho de 2026, Observatório Nacional



Conteúdo/objetivos – parte 1

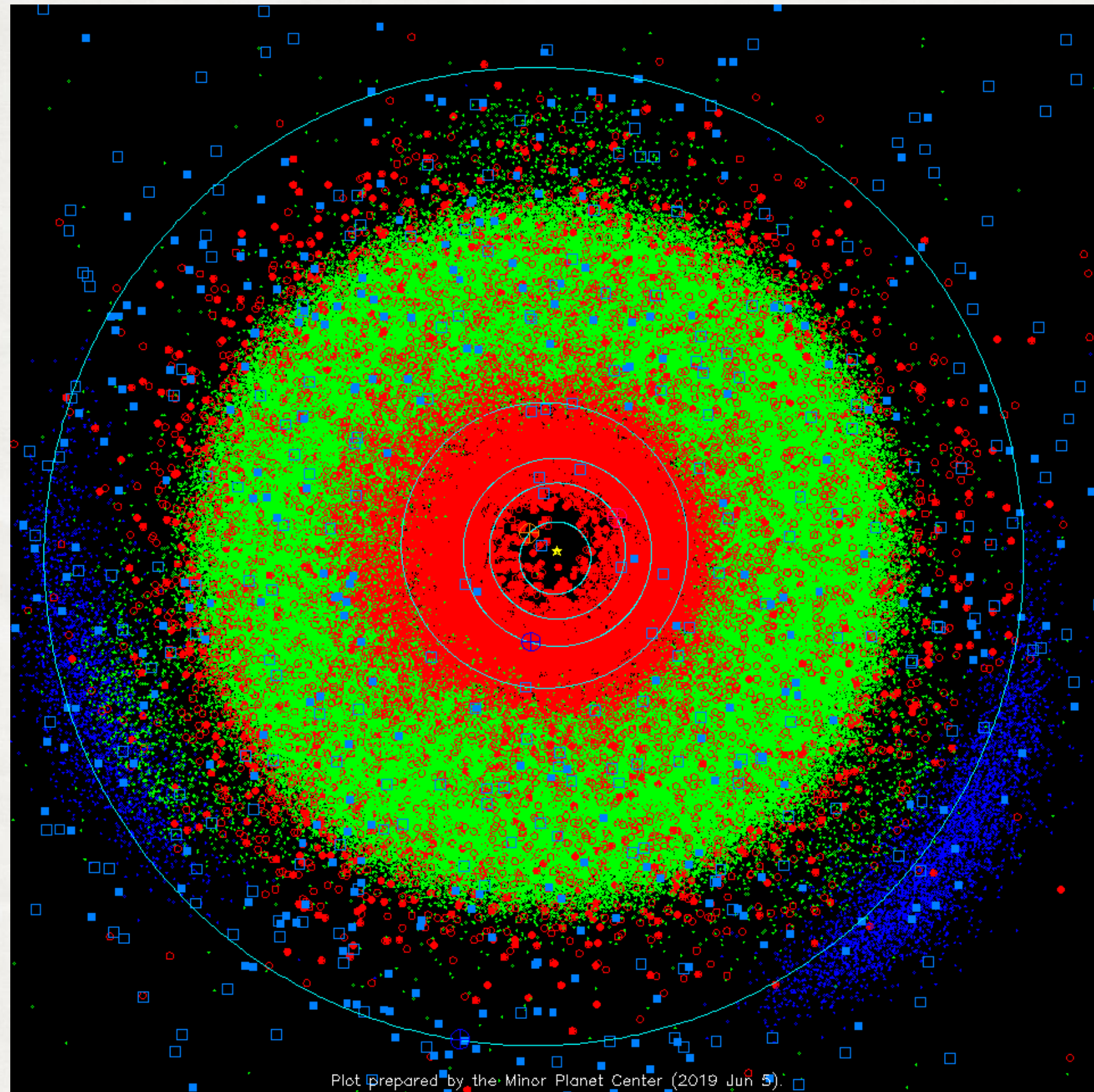
- **Apresentar os tipos de pequenos corpos do Sistema Solar.**
- **Discutir os aspectos dinâmicos que governam suas órbitas.**
- **Entender como a distribuição orbital atual pode restringir os modelos de formação e evolução do Sistema Solar**
- **Asteroides próximos da Terra e seus riscos para o nosso planeta.**
- **Meteoros, meteoritos.**

Pequenos corpos do Sistema Solar



- Asteroides do Cinturão Principal
- Asteroides próximos da Terra
- Asteroides troianos de Júpiter

Pequenos corpos do Sistema Solar



RESOLUTION B5

Definition of a Planet in the Solar System

Contemporary observations are changing our understanding of planetary systems, and it is important that our nomenclature for objects reflect our current understanding. This applies, in particular, to the designation "planets". The word "planet" originally described "wanderers" that were known only as moving lights in the sky. Recent discoveries lead us to create a new definition, which we can make using currently available scientific information.

The IAU therefore resolves that planets and other bodies, except satellites, in our Solar System be defined into three distinct categories in the following way:

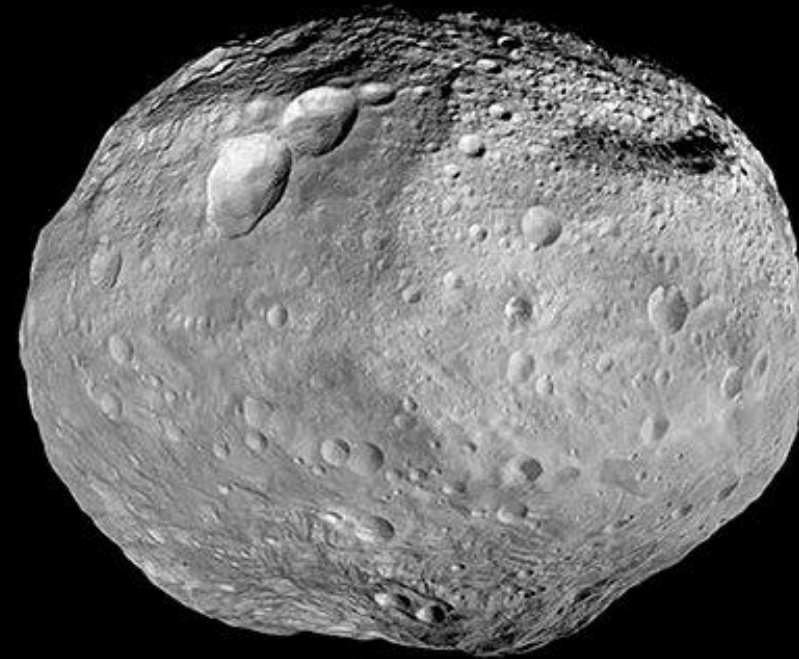
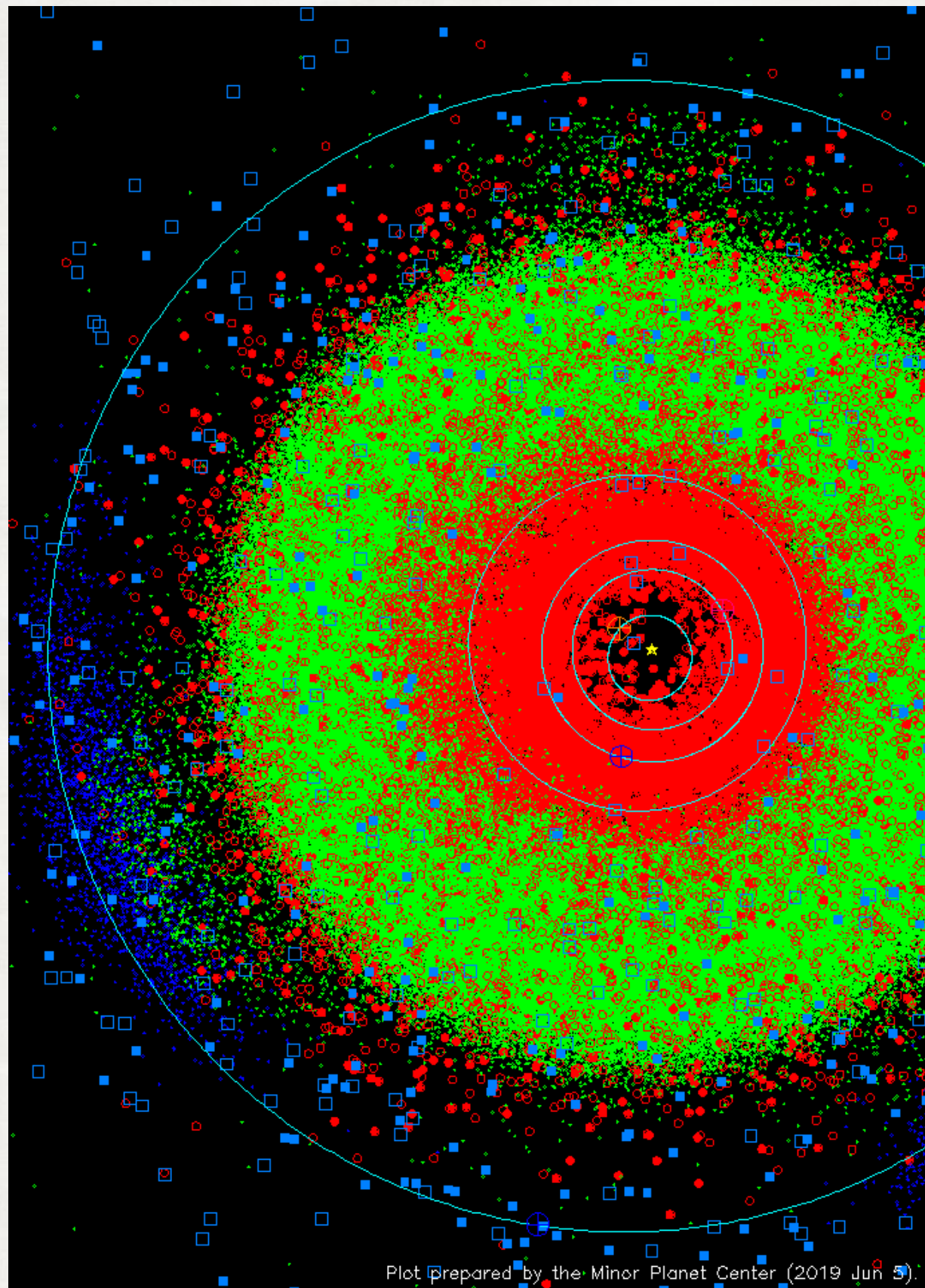
- (1) A planet¹ is a celestial body that
 - (a) is in orbit around the Sun,
 - (b) has sufficient mass for its self-gravity to overcome rigid body forces so that it assumes a hydrostatic equilibrium (nearly round) shape, and
 - (c) has cleared the neighbourhood around its orbit.
- (2) A "dwarf planet" is a celestial body that
 - (a) is in orbit around the Sun,
 - (b) has sufficient mass for its self-gravity to overcome rigid body forces so that it assumes a hydrostatic equilibrium (nearly round) shape²,
 - (c) has not cleared the neighbourhood around its orbit, and
 - (d) is not a satellite.
- (3) All other objects³, except satellites, orbiting the Sun shall be referred to collectively as "Small Solar System Bodies".

¹ The eight planets are: Mercury, Venus, Earth, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus, and Neptune.

² An IAU process will be established to assign borderline objects to the dwarf planet or to another category.

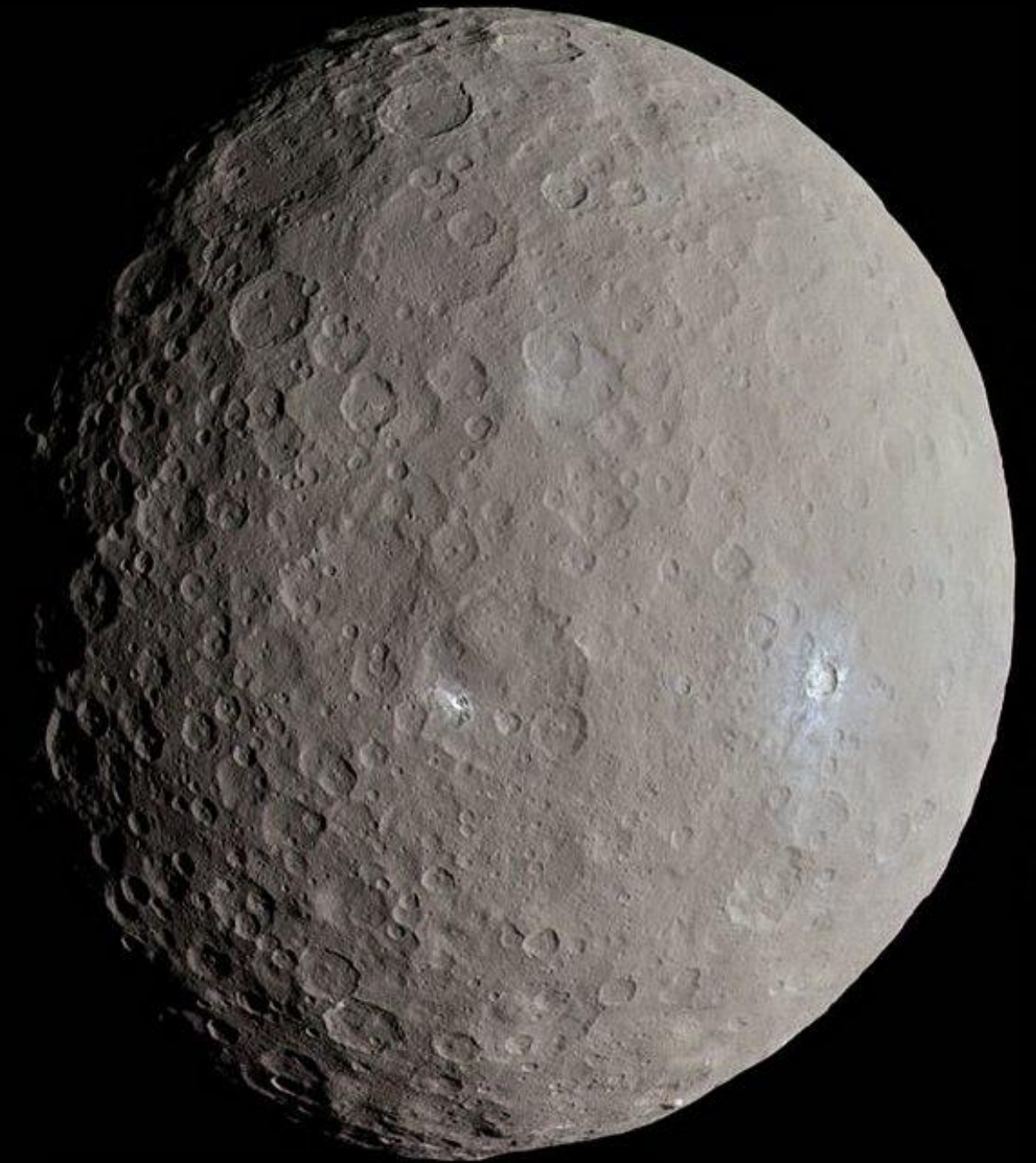
³ These currently include most of the Solar System asteroids, most Trans-Neptunian Objects (TNOs), comets, and other small bodies.

Pequenos corpos do Sistema Solar



Vesta
530 km

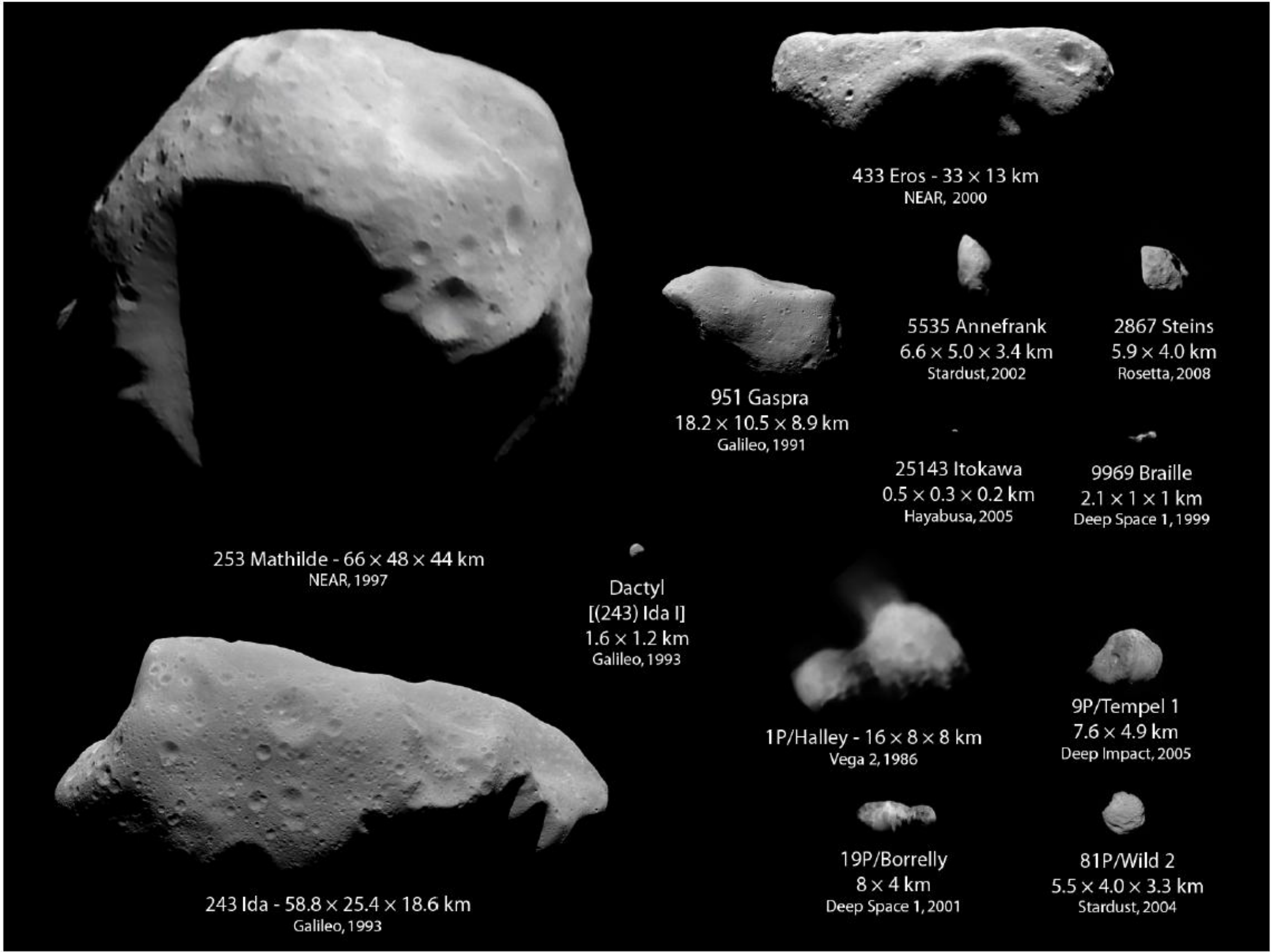
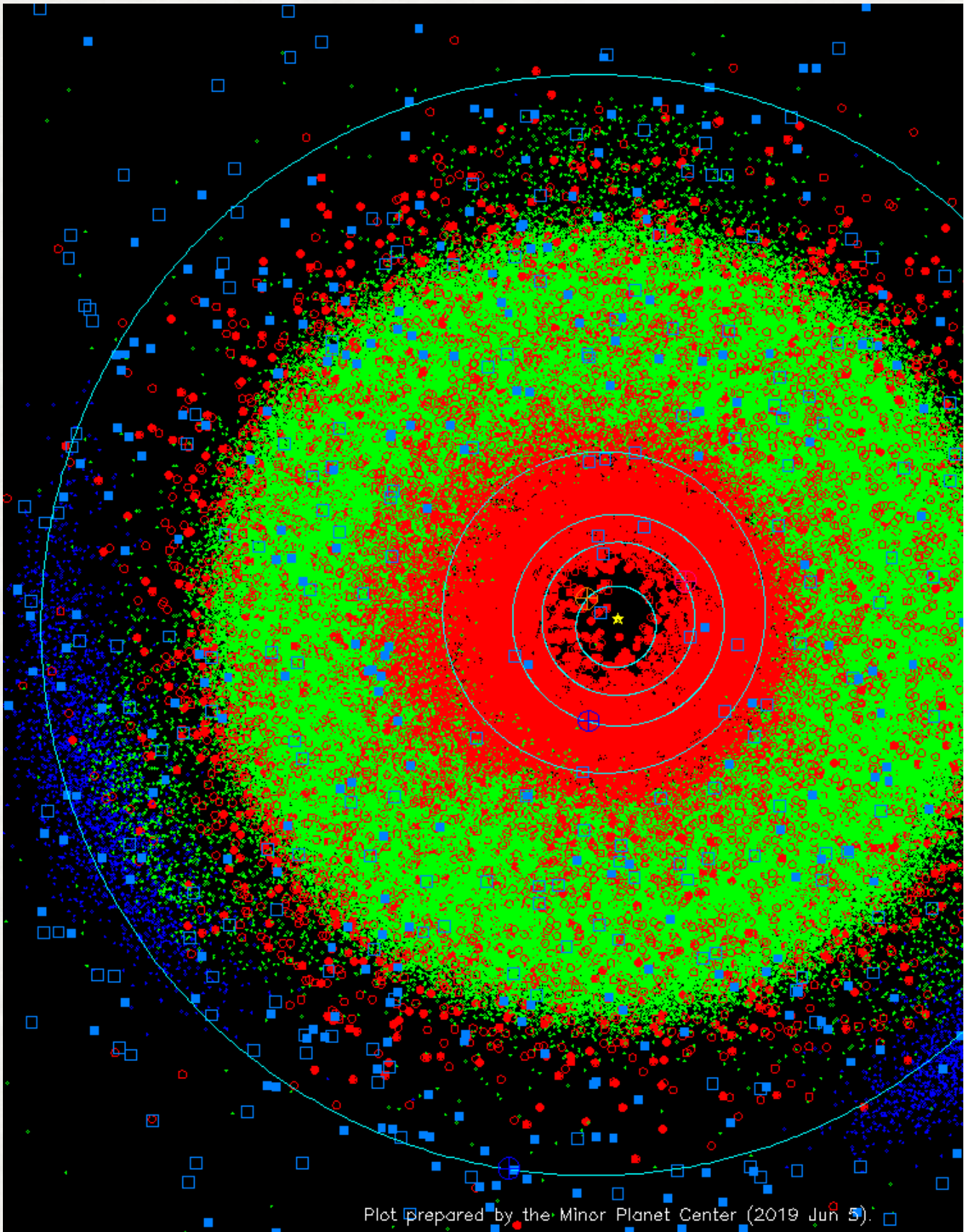
Visited by
Dawn
spacecraft



Ceres
950 km

Image Credit: NASA / JPL-Caltech

Pequenos corpos do Sistema Solar



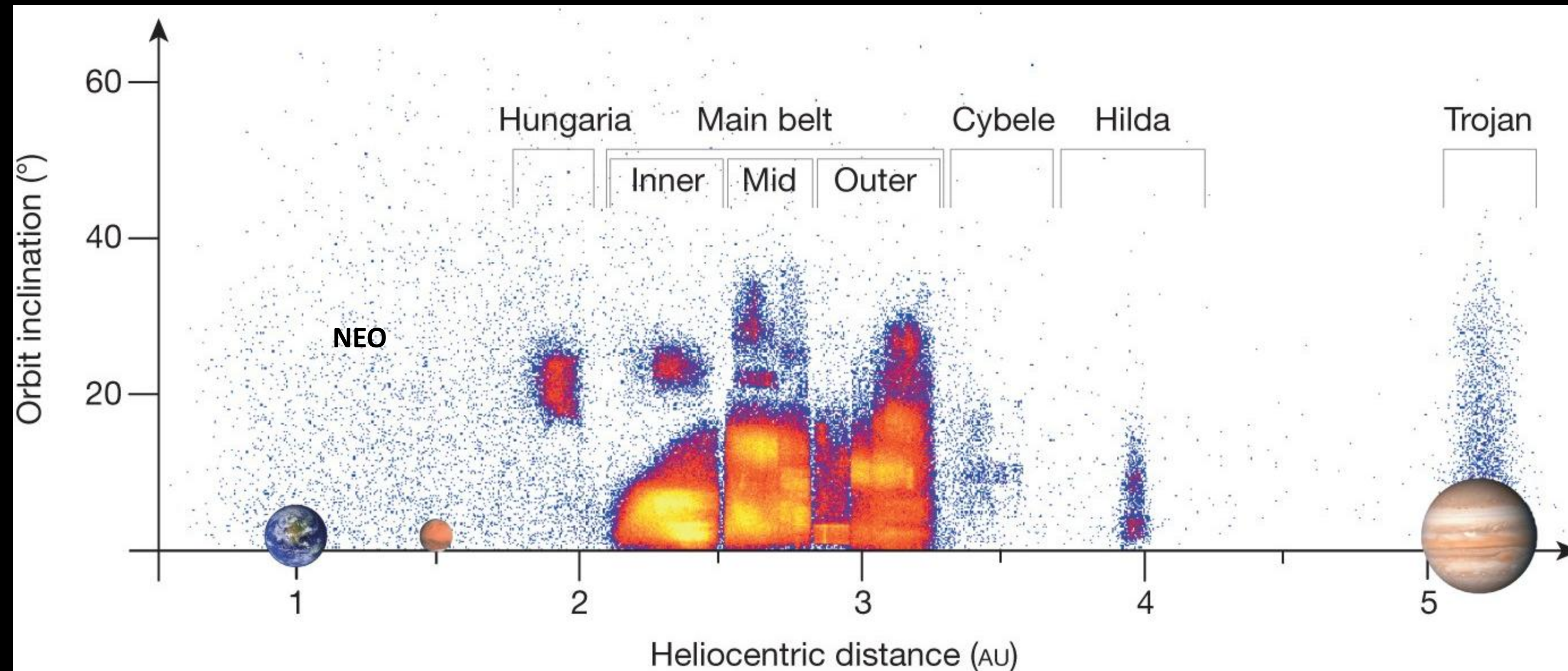
Por que estudar os pequenos corpos?

- ❑ Os asteroides podem nos dizer sobre as origens do Sistema Solar, pois são considerados os blocos de construção dos planetas;
- ❑ Asteroides (e cometas) podem ter entregado os elementos voláteis e água para a Terra;
- ❑ Os asteroides podem servir como pontos de parada - e fornecer recursos - para a futura exploração espacial;
- ❑ Asteroides ajudam a compreender como o Sistema solar evoluiu e a restringir modelos de formação;
- ❑ **Asteroides podem oferecer risco para a Terra.**



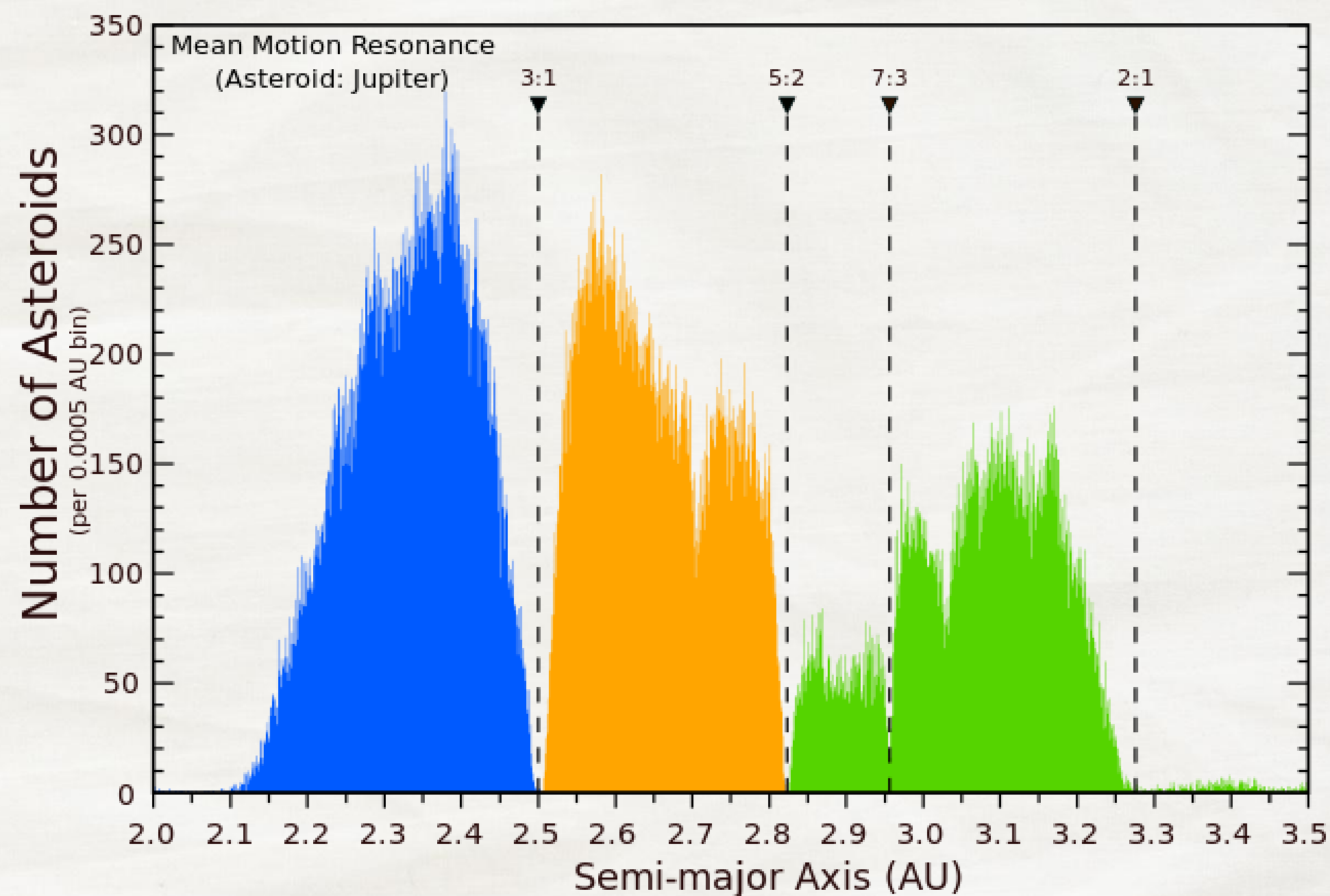
Imagem: JPL/NASA, on 2 December 2018 by OSIRIS-Rex/NASA

Distribuição de Asteroides



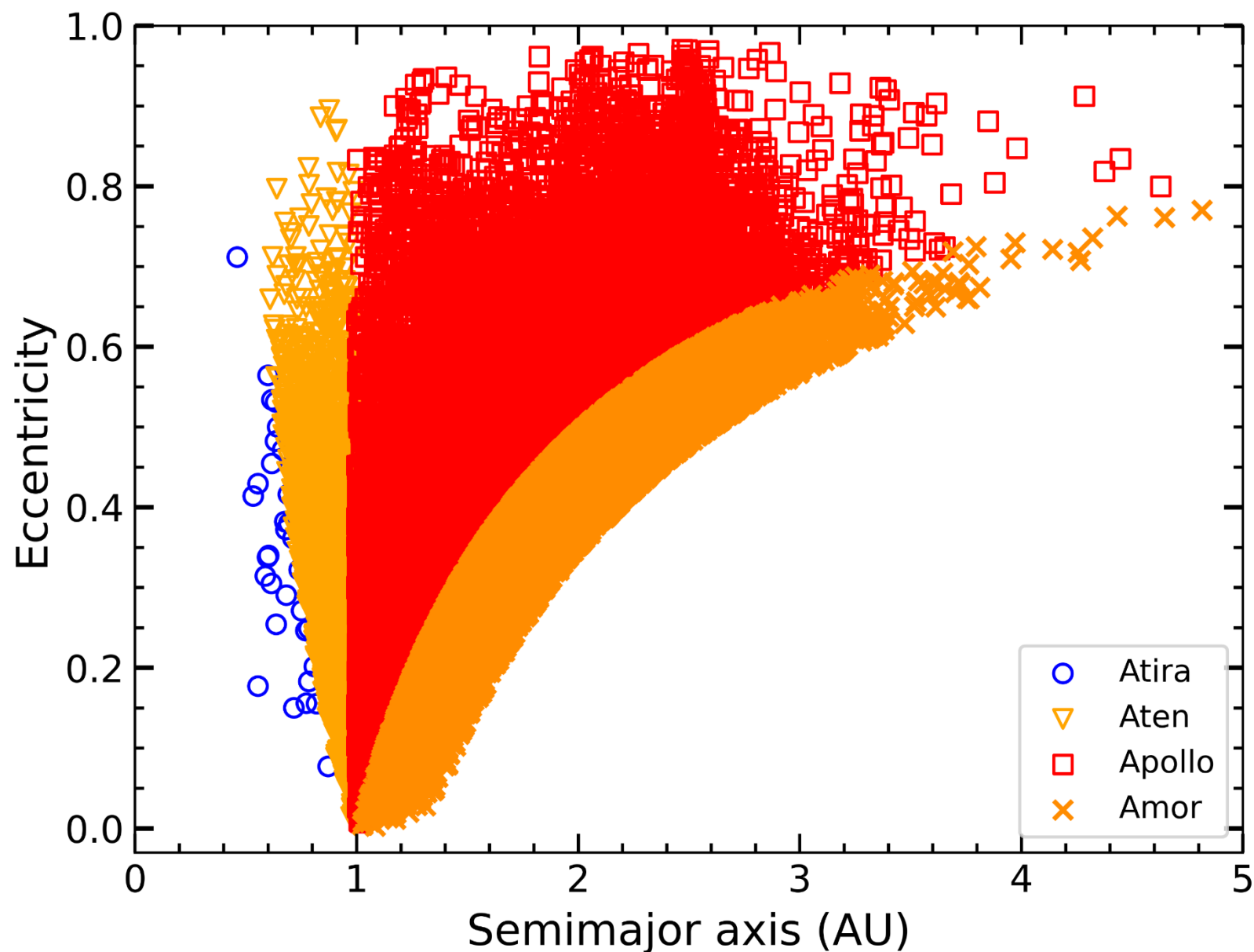
- Mais de 1,35 milhões conhecidos

Distribuição de Asteroides

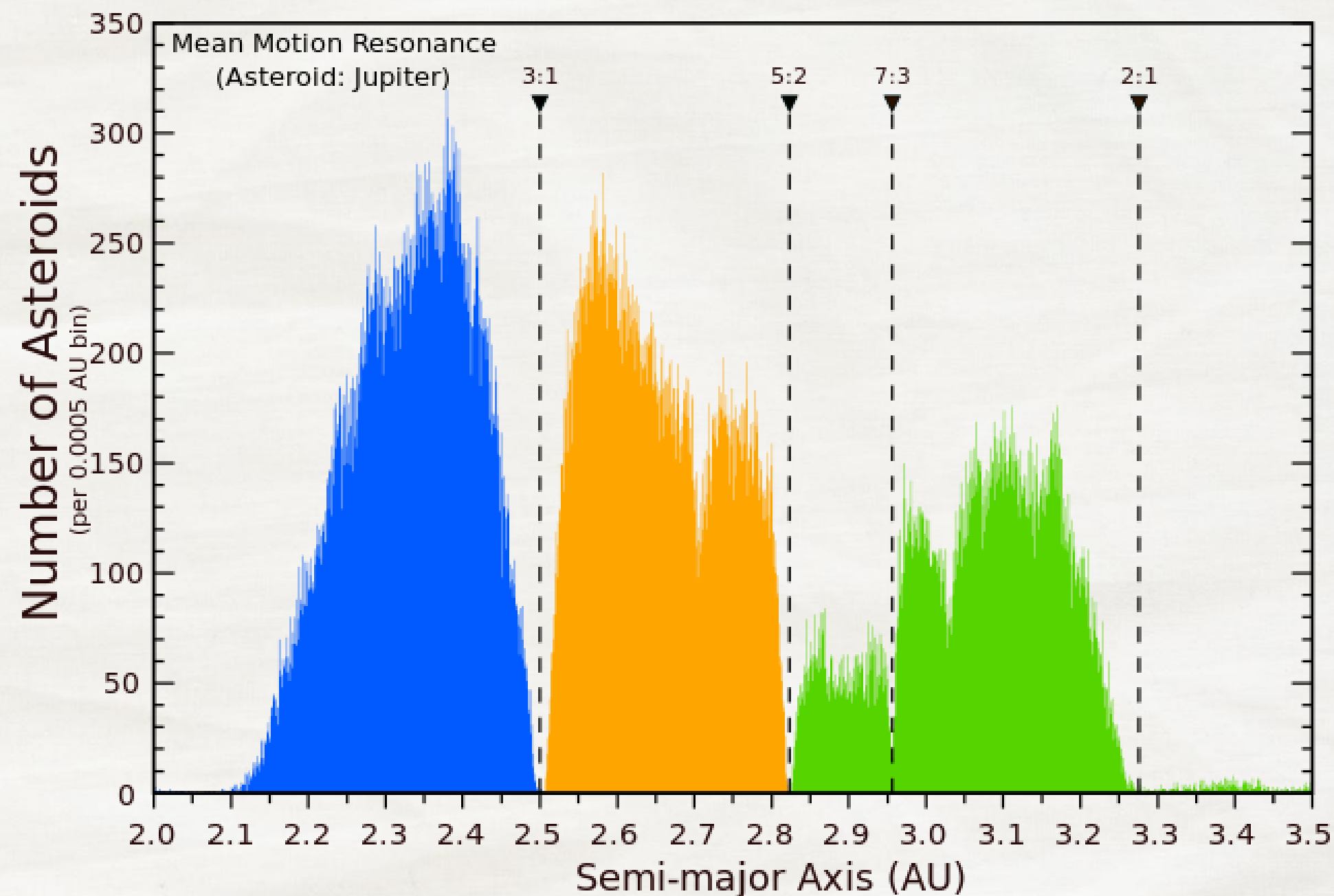


Estrutura do Cinturão Principal moldada por ressonâncias com Júpiter (falhas de Kirkwood)

Distribuição de Asteroides

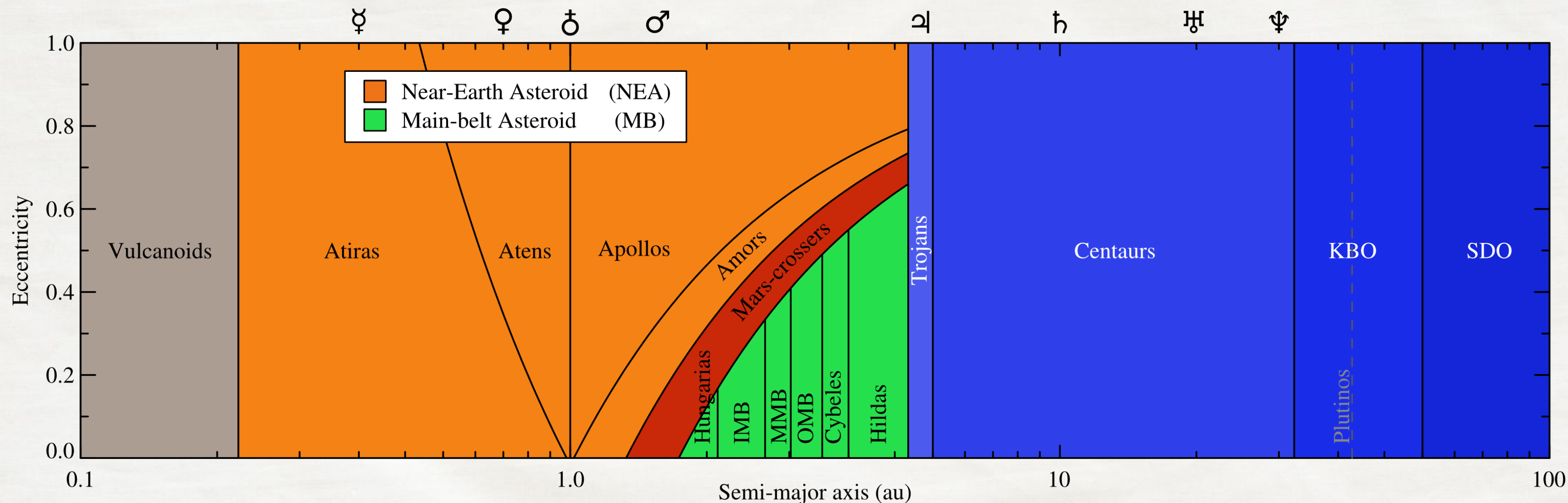


A população de NEOs é uma população transiente, com objetos provenientes de várias regiões do SS.



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

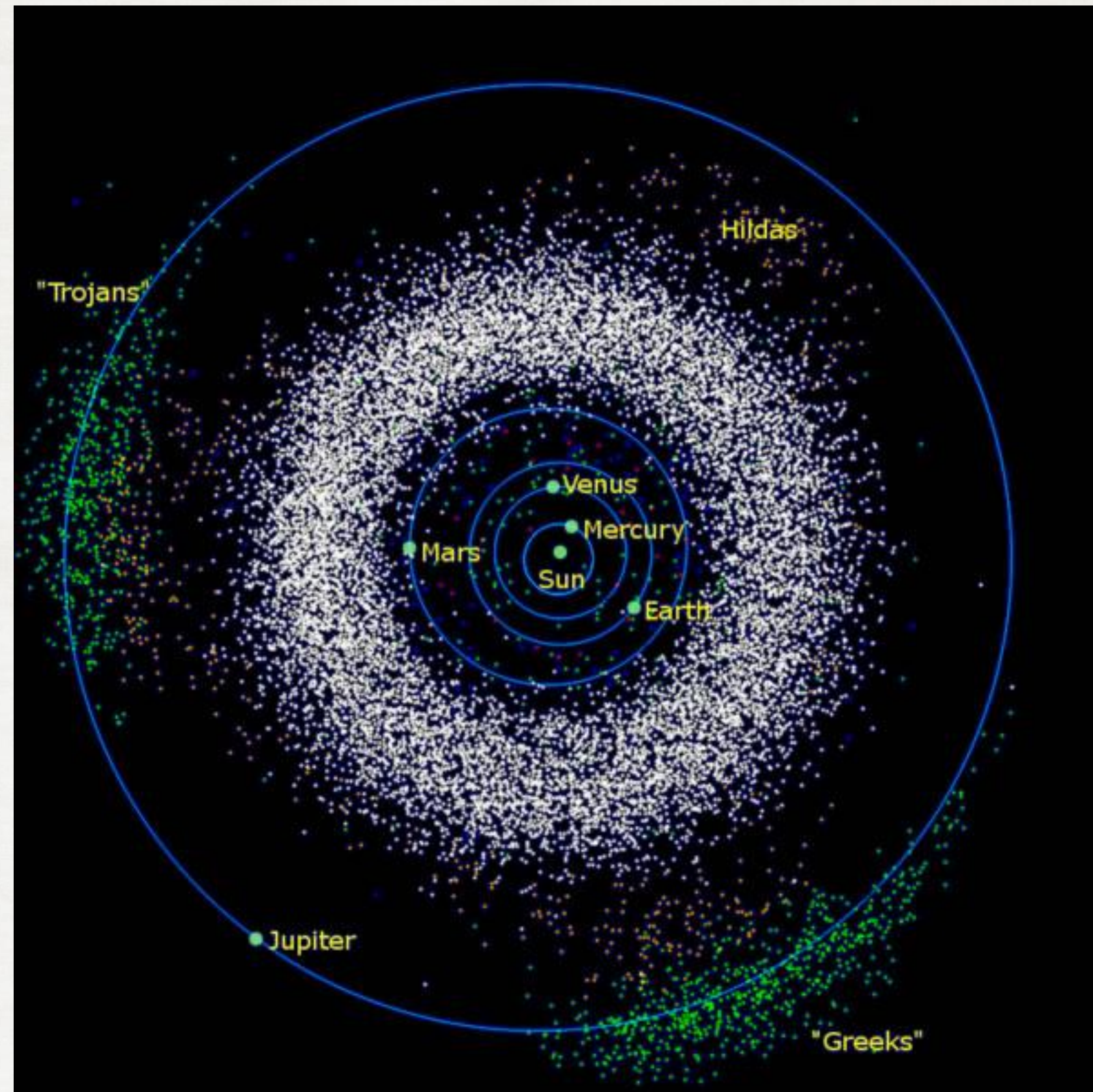
Distribuição de Asteroides



❖ Centauros: corpos com órbitas que cruzam as dos quatro planetas gigantes; Tempo de vida média de 9 milhões de anos.

❖ Origem nos TNOs espalhados; População de transição

Distribuição de Asteroides – Hildas e Troianos

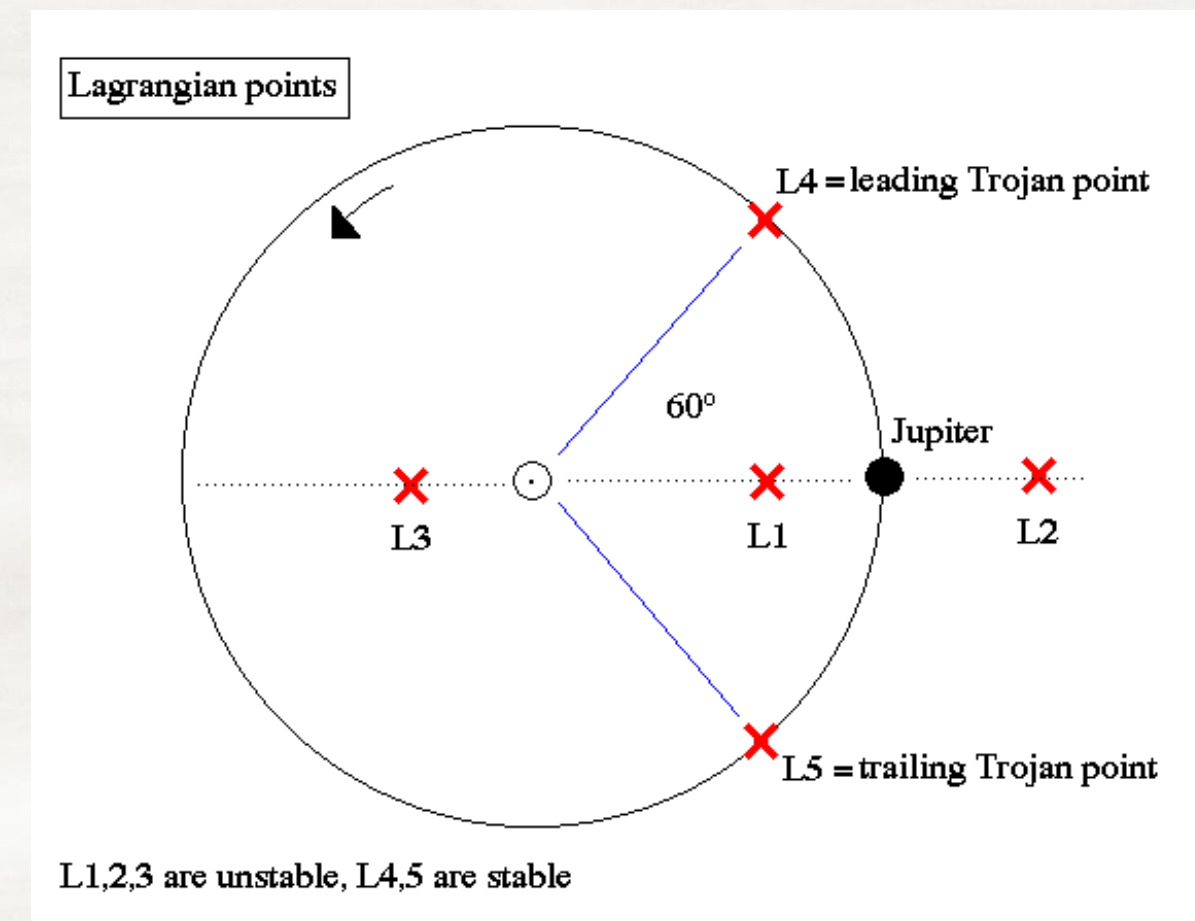


❑ Troianos (Ressonância 1:1)

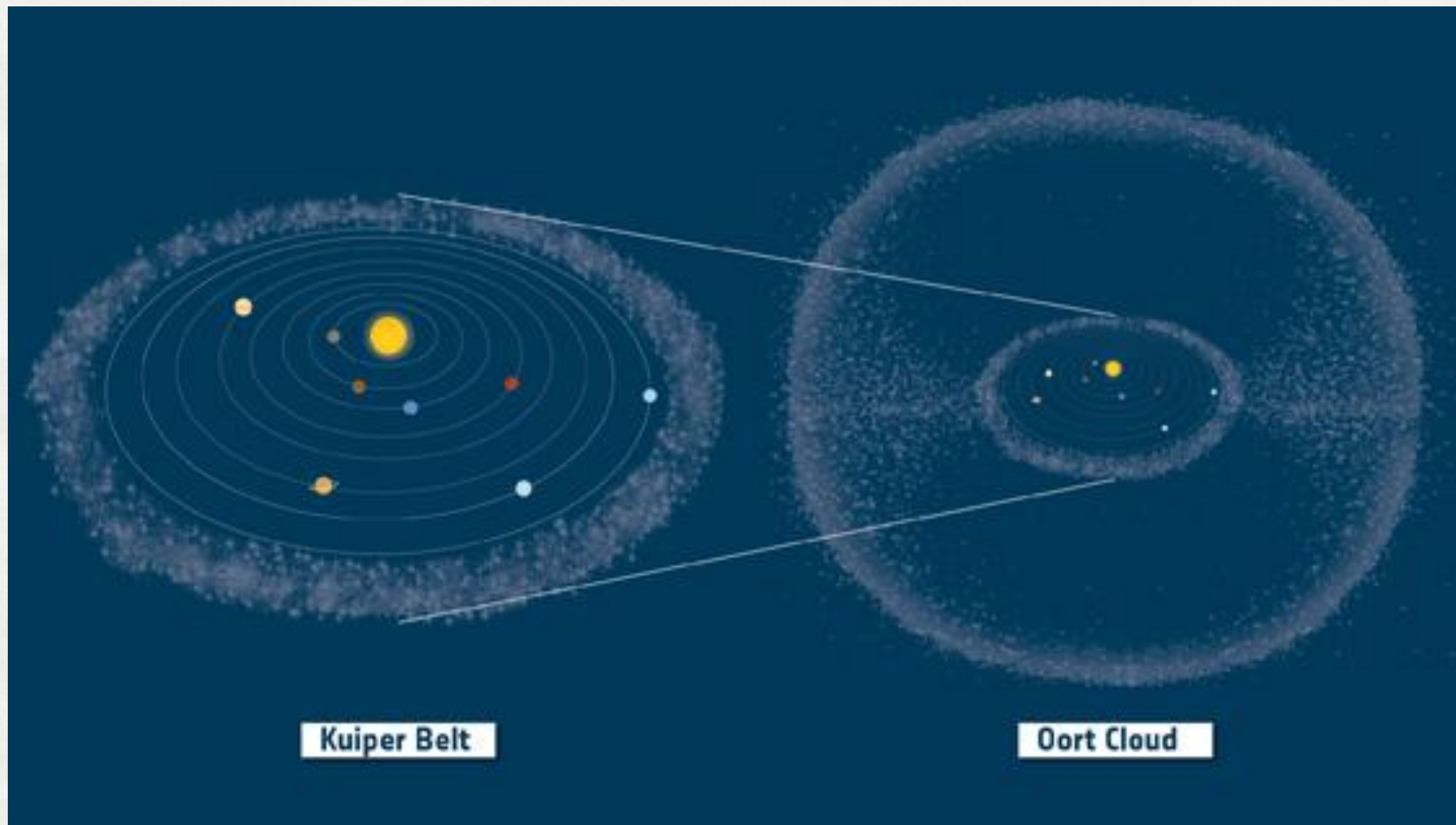
Como funcionam: Os Troianos dividem exatamente a mesma órbita com Júpiter.

Configuração: Eles ficam "presos" nos pontos lagrangianos estáveis L_4 e L_5 (a exatamente 60° e atrás de Júpiter).

❑ Hildas - Estão presos na ressonância 3:2.

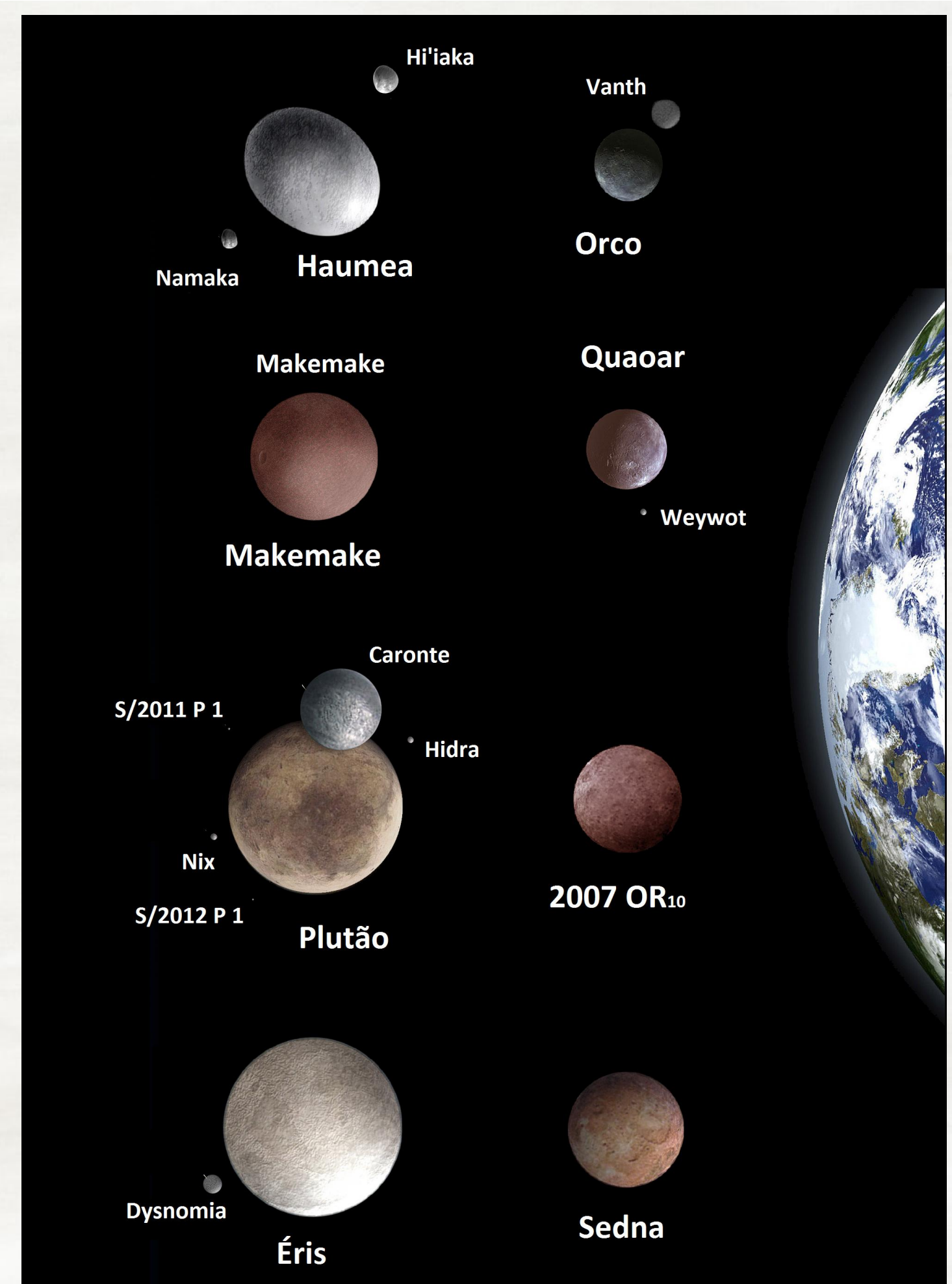


Distribuição de Asteroides – Cinturão de Kuiper/Fernandez

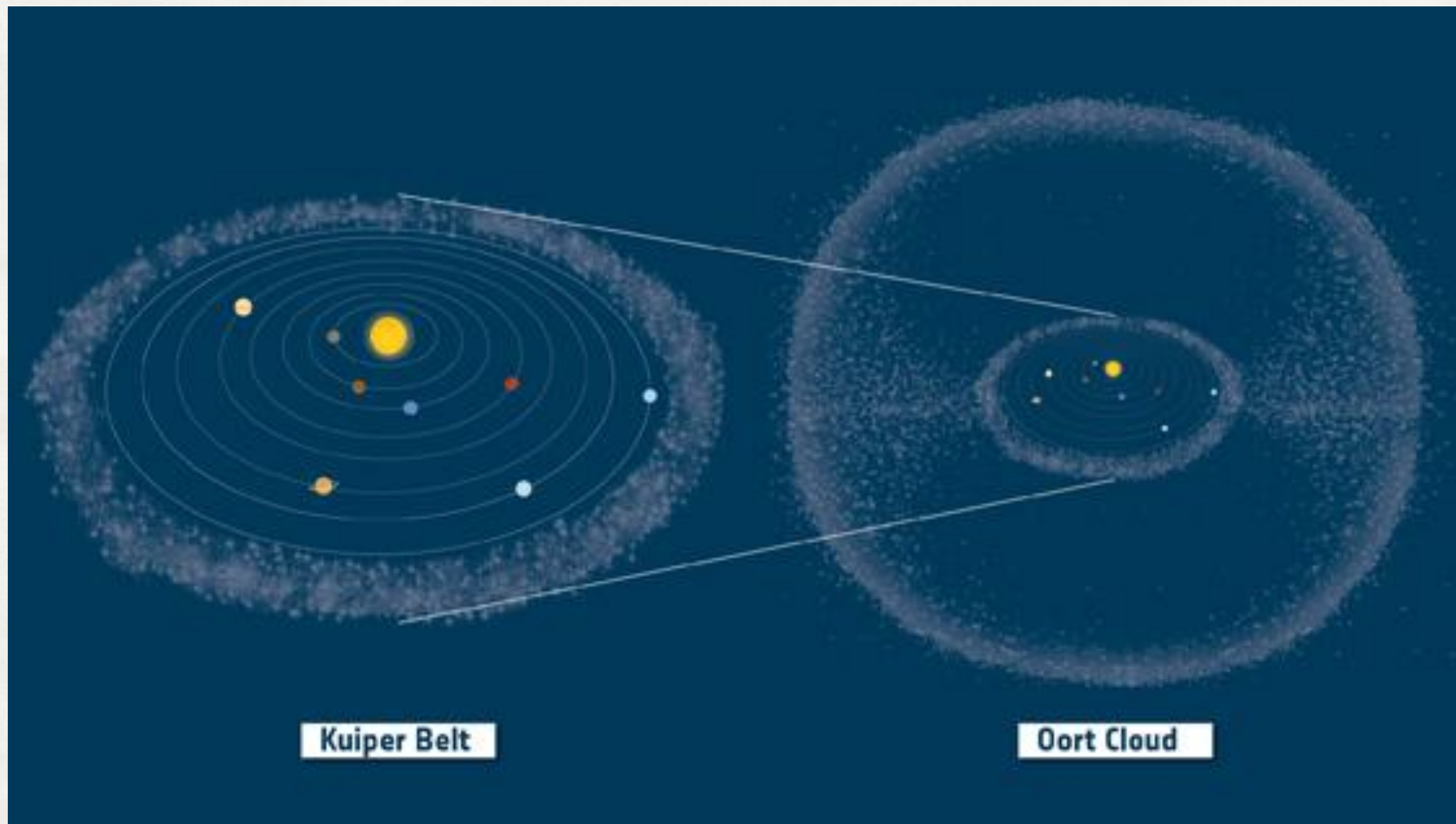


Cinturão de Fernandez entre 30 e 50 UA.

Haumea e Quaoar tem anéis!



Distribuição de Asteroides – Cinturão de Kuiper/Fernandez



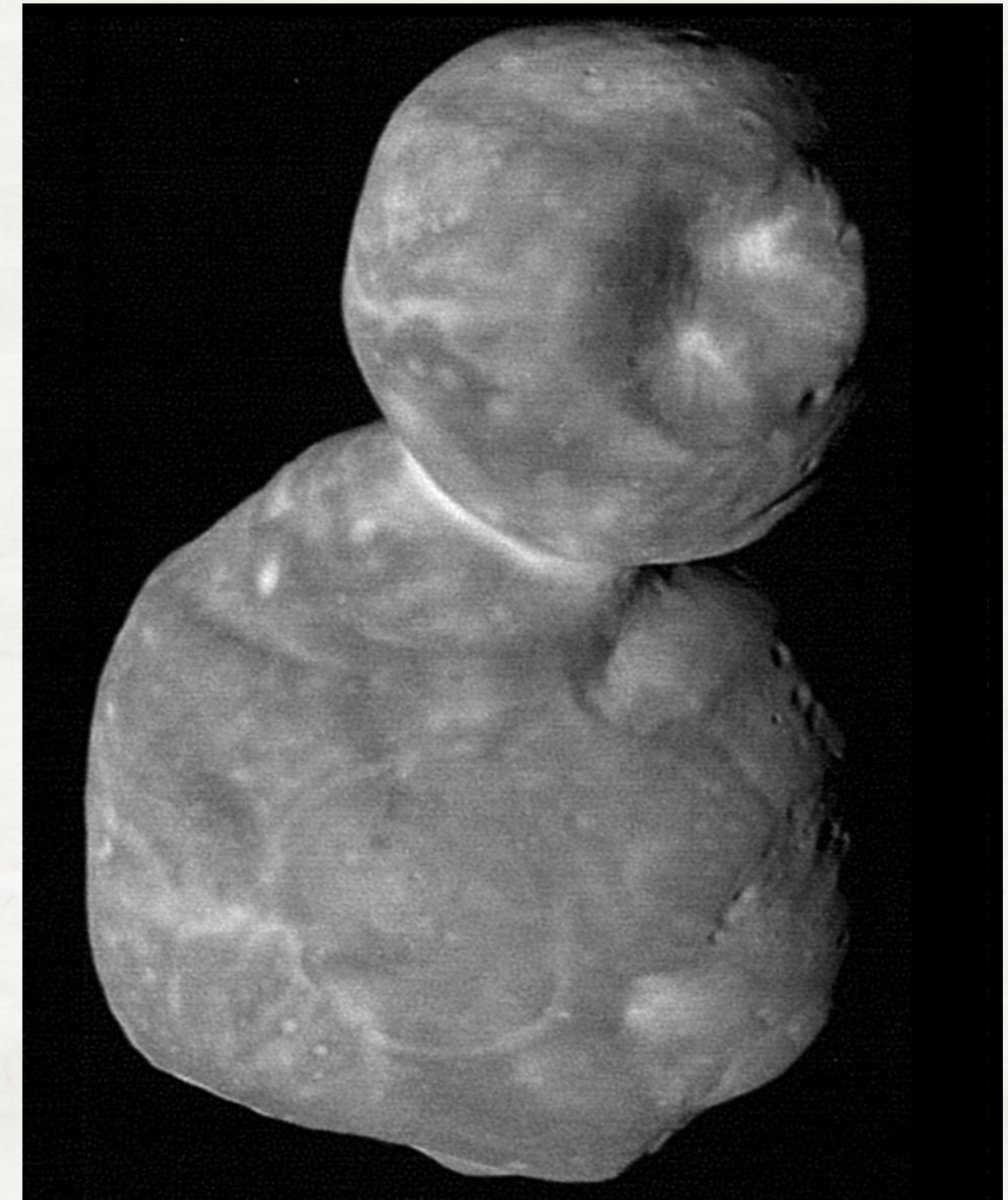
Dr. Julio Fernandez

Fernández usou simulações numéricas para provar que a região era dinamicamente estável e que deveria existir um cinturão de corpos gelados na região entre 30 e 50 UA. Trabalho de 1980.

Distribuição de Asteroides – Cinturão de Kuiper/Fernandez



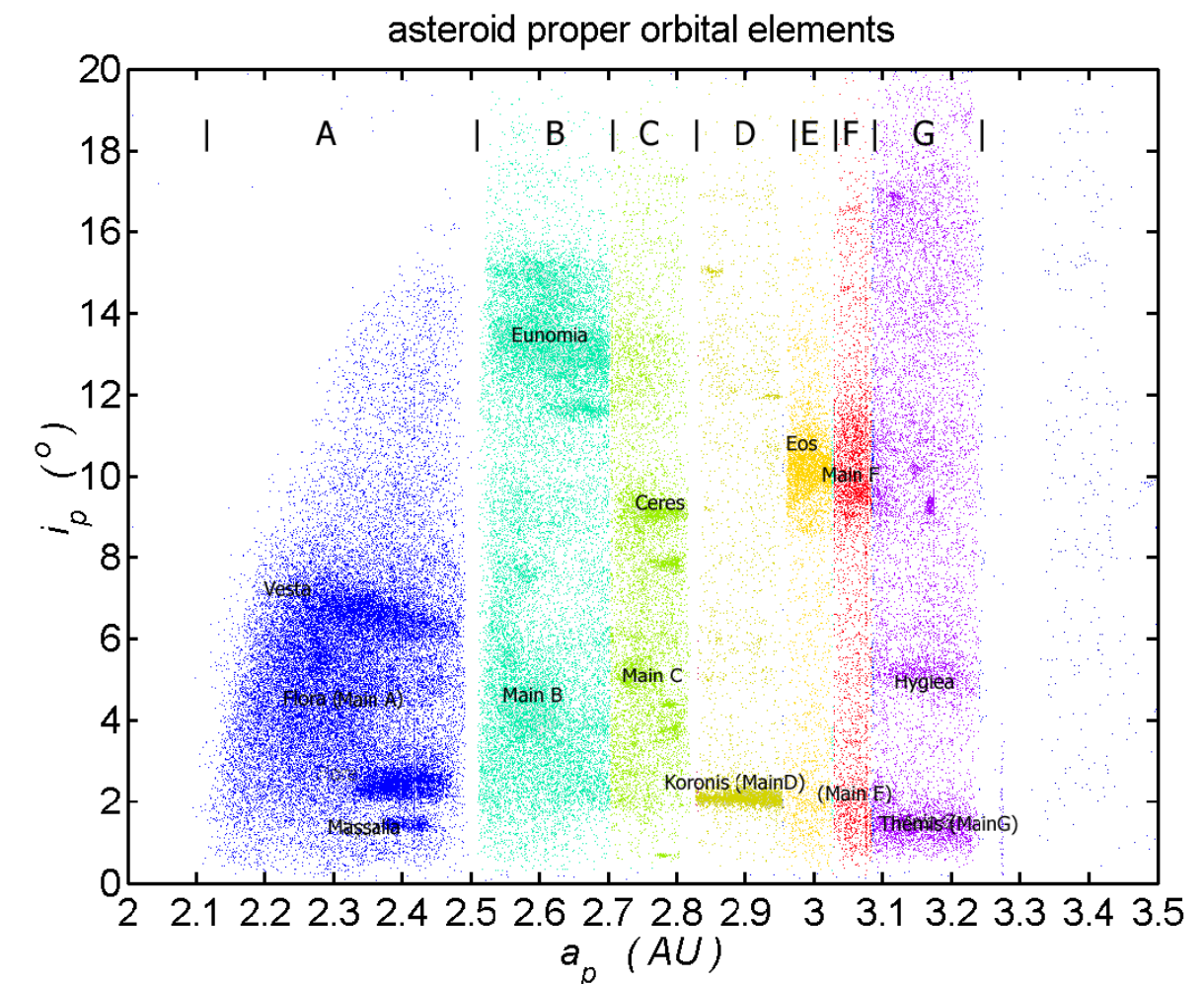
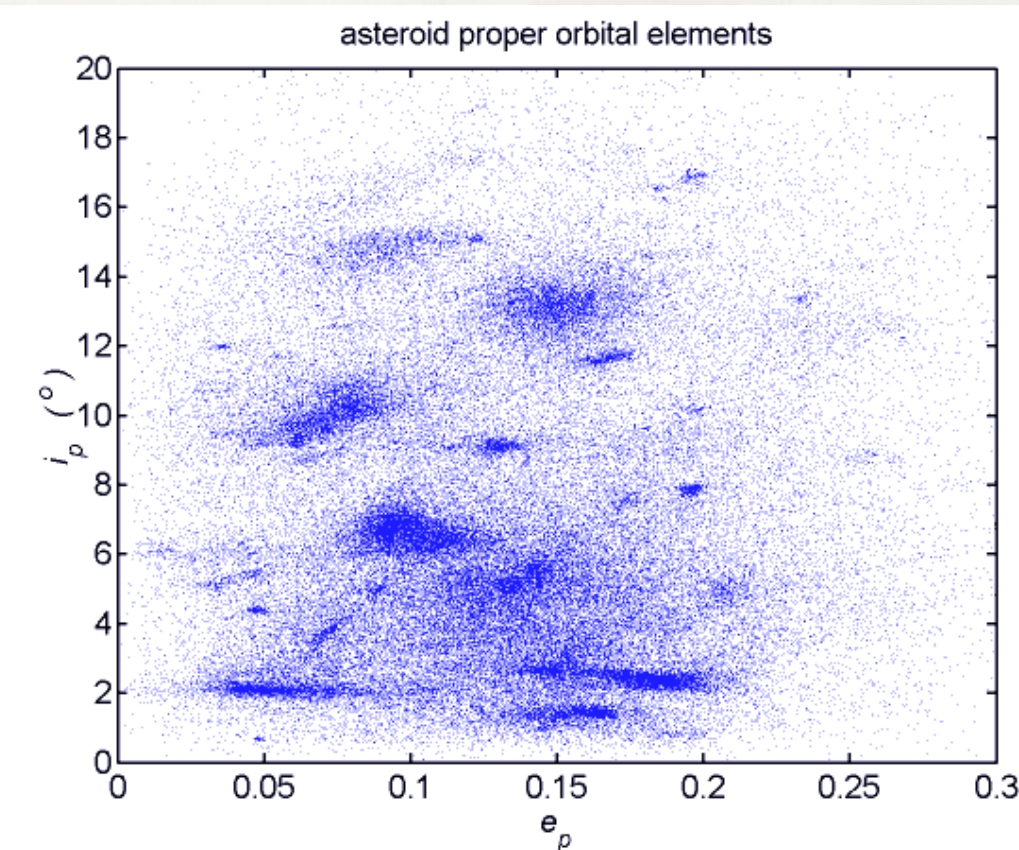
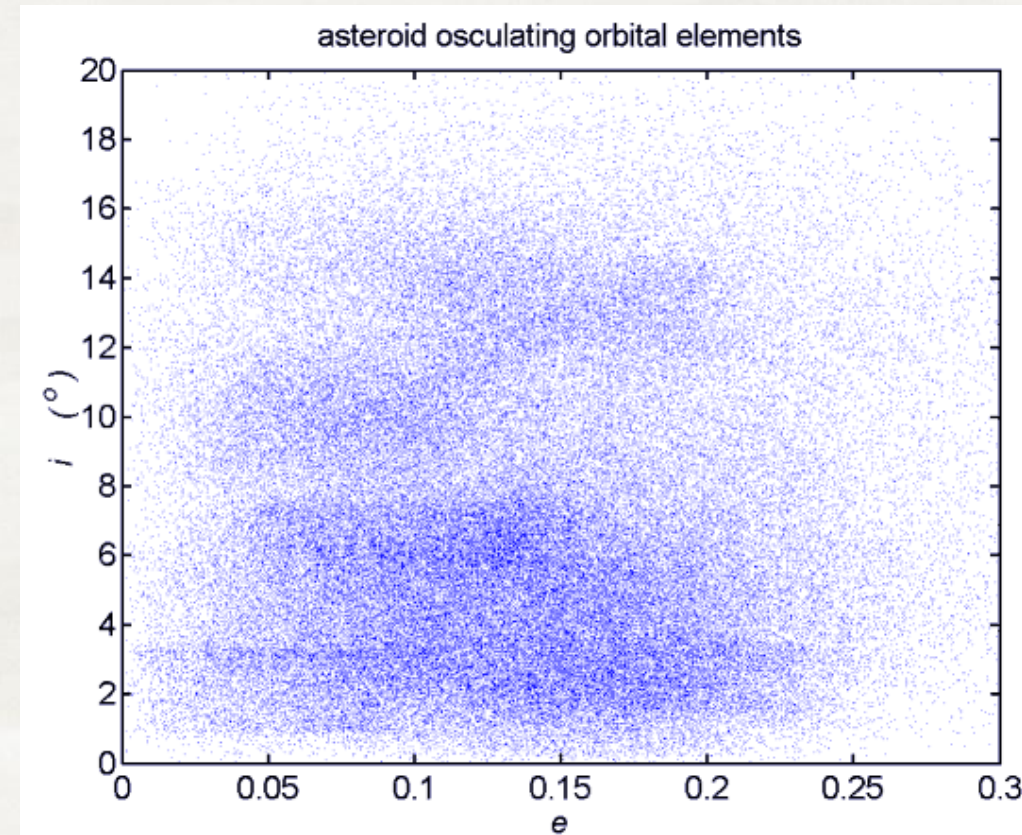
Plutão,
(New Horizons 2019)



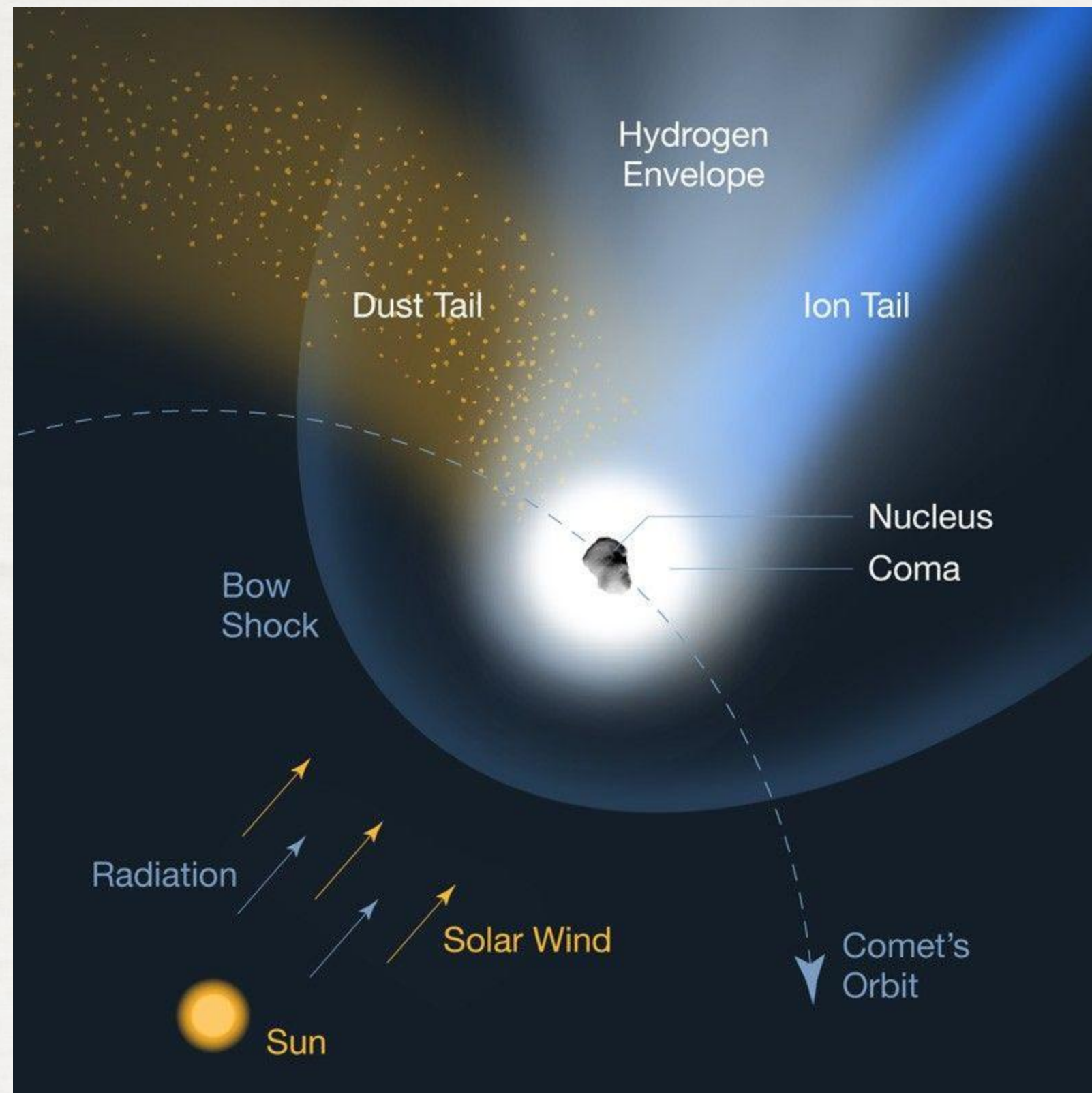
486958 Arrokoth
(New Horizons 2019)

Famílias de asteroides

- ❑ Alguns asteroides se agrupam formando famílias.
- ❑ Decorrentes de colisões e fragmentações de corpos maiores
- ❑ Composição Semelhante: comprovado pelas assinaturas espectrais dos membros.
- ❑ Elementos Orbitais Próprios: Eles mantêm parâmetros orbitais muito semelhantes (ex. semieixo maior, inclinação e excentricidade da órbita).

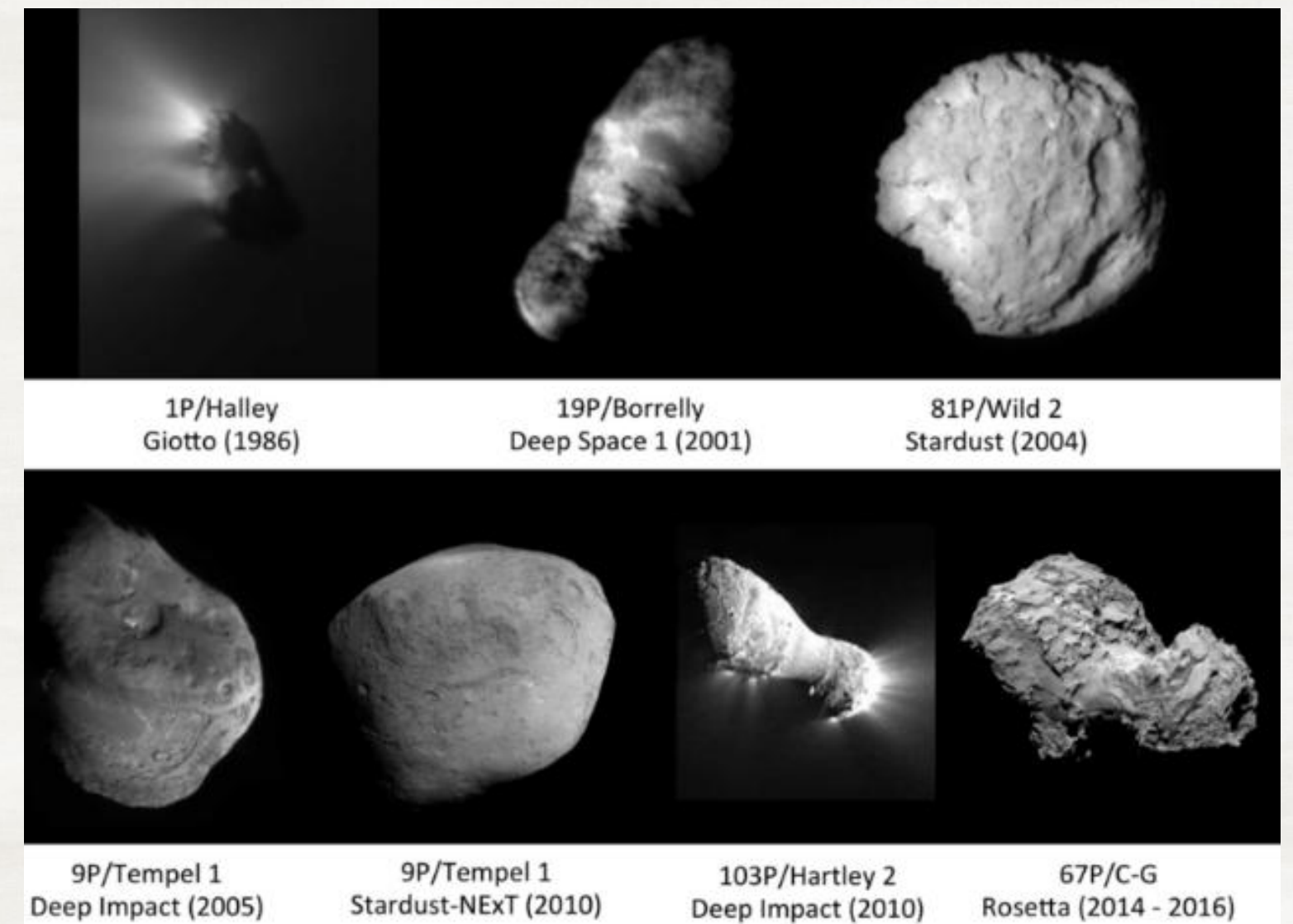


Cometas

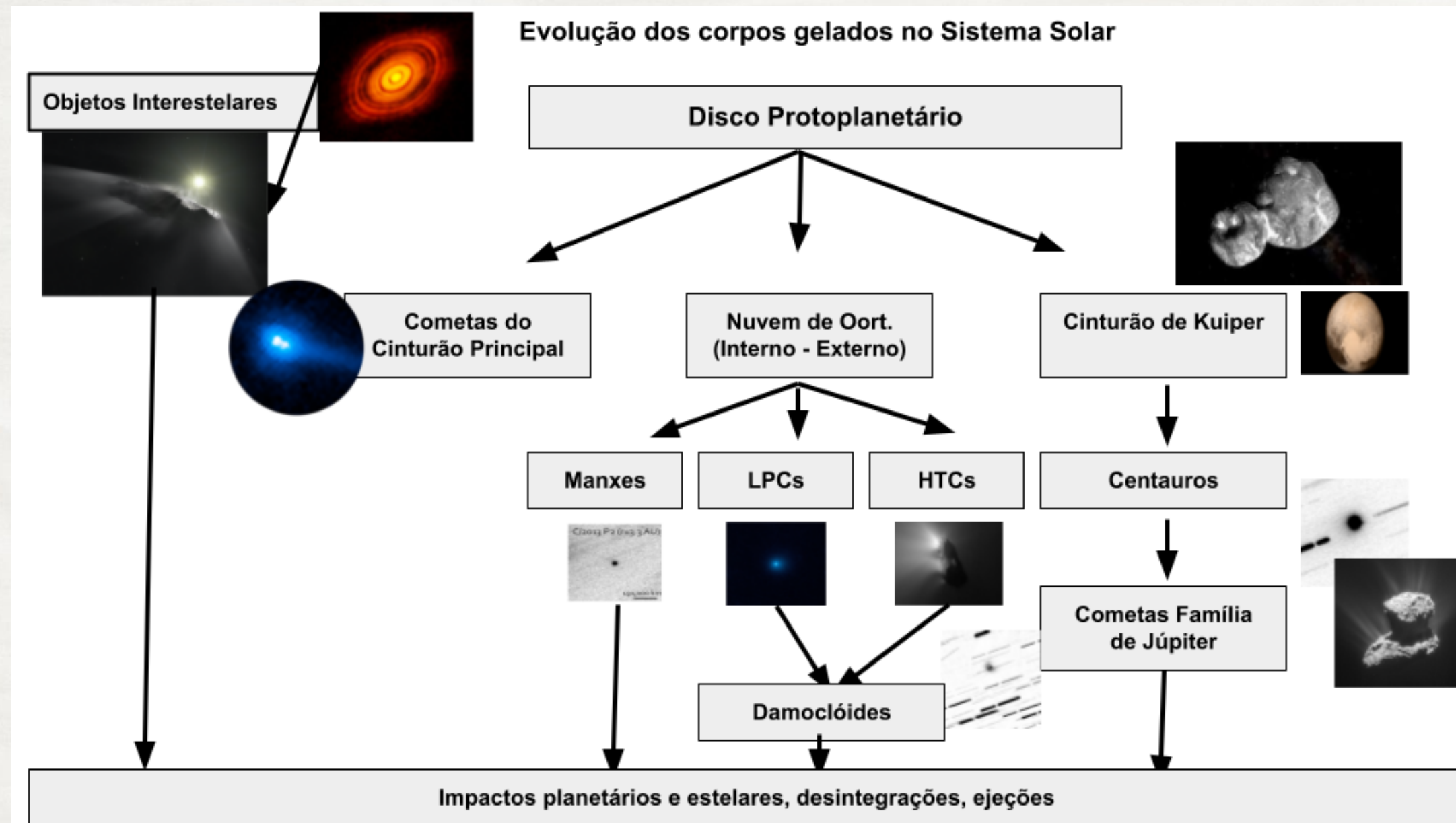


- ❑ Objetos que apresentam atividade (sublimação de materiais voláteis) ao se aproximar do Sol
- ❑ Caracterizados dinamicamente pelo parâmetro de Tisserand respeito de Júpiter:
$$T = \frac{a_p}{a} + 2 \sqrt{\frac{a}{a_p} (1 - e^2) \cos i}$$
- ❑ Cometas têm $T_J < 3$ e $q < 10$ au.
- ❑ Podem ser periódicos ou não periódicos
- ❑ Não periódicos são caracterizados por órbitas parabólicas ou levemente hiperbólicas ($1,0 \leq e < 1,02$).

Cometas

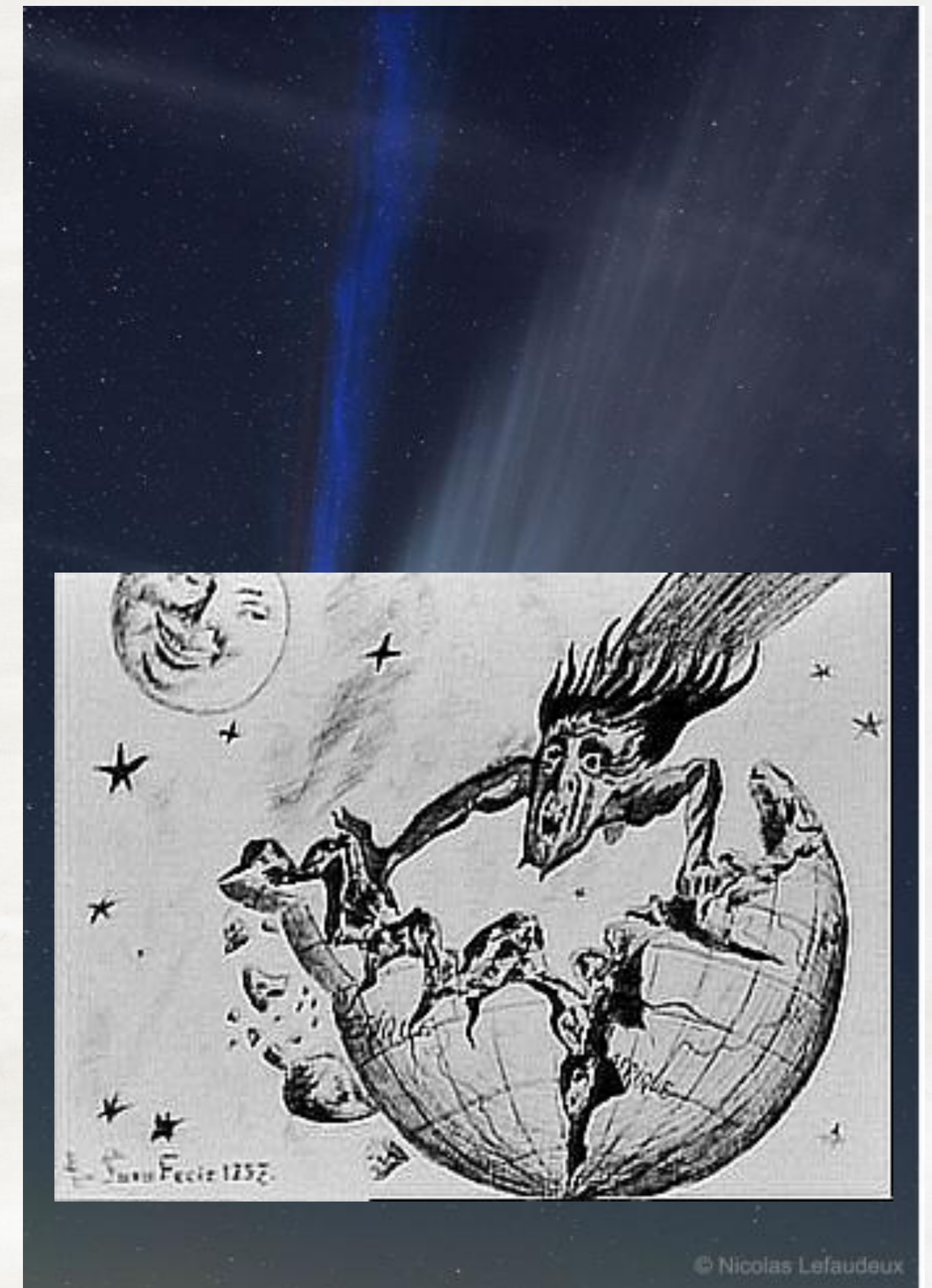
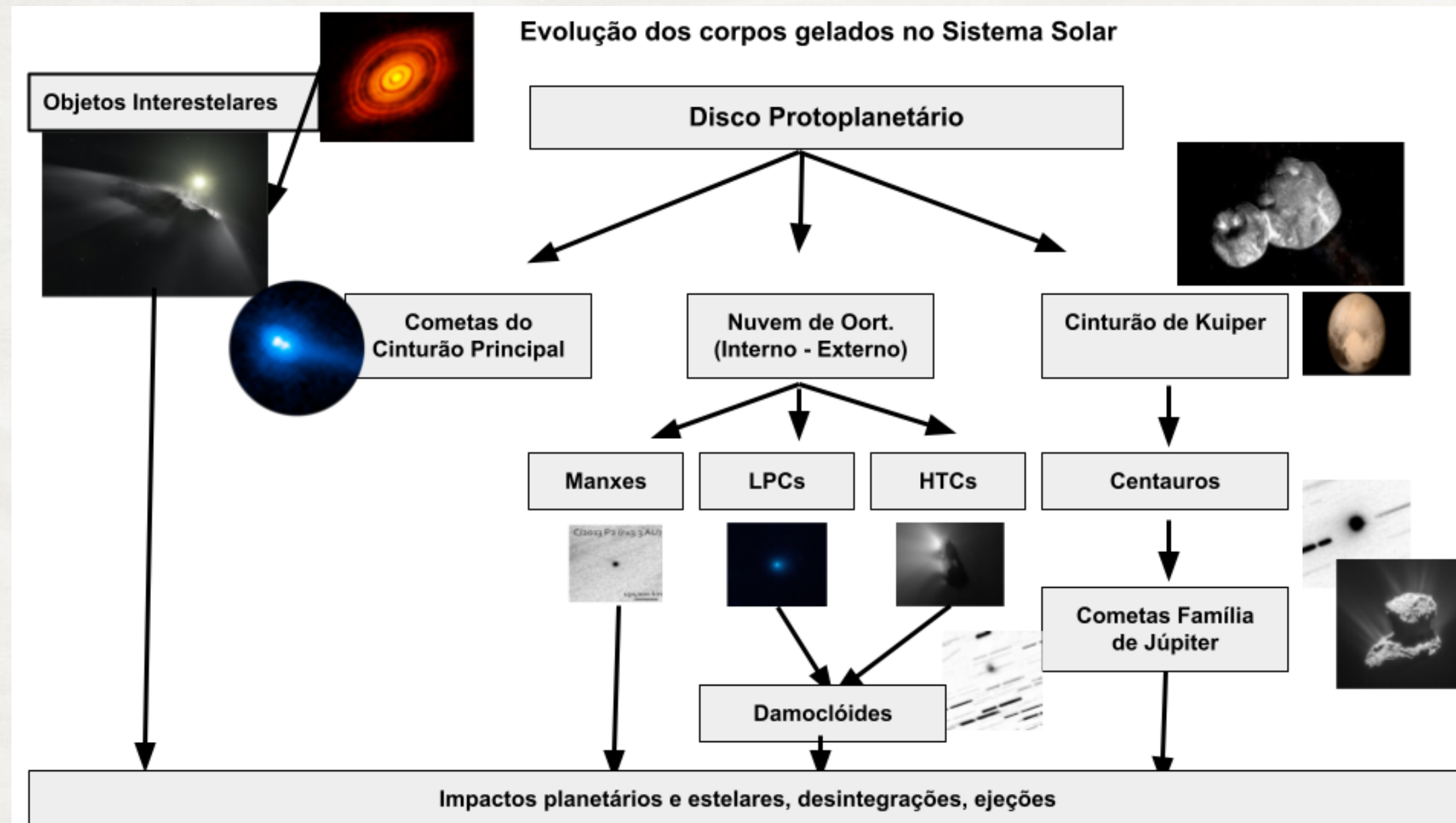


Evolução dos Cometas

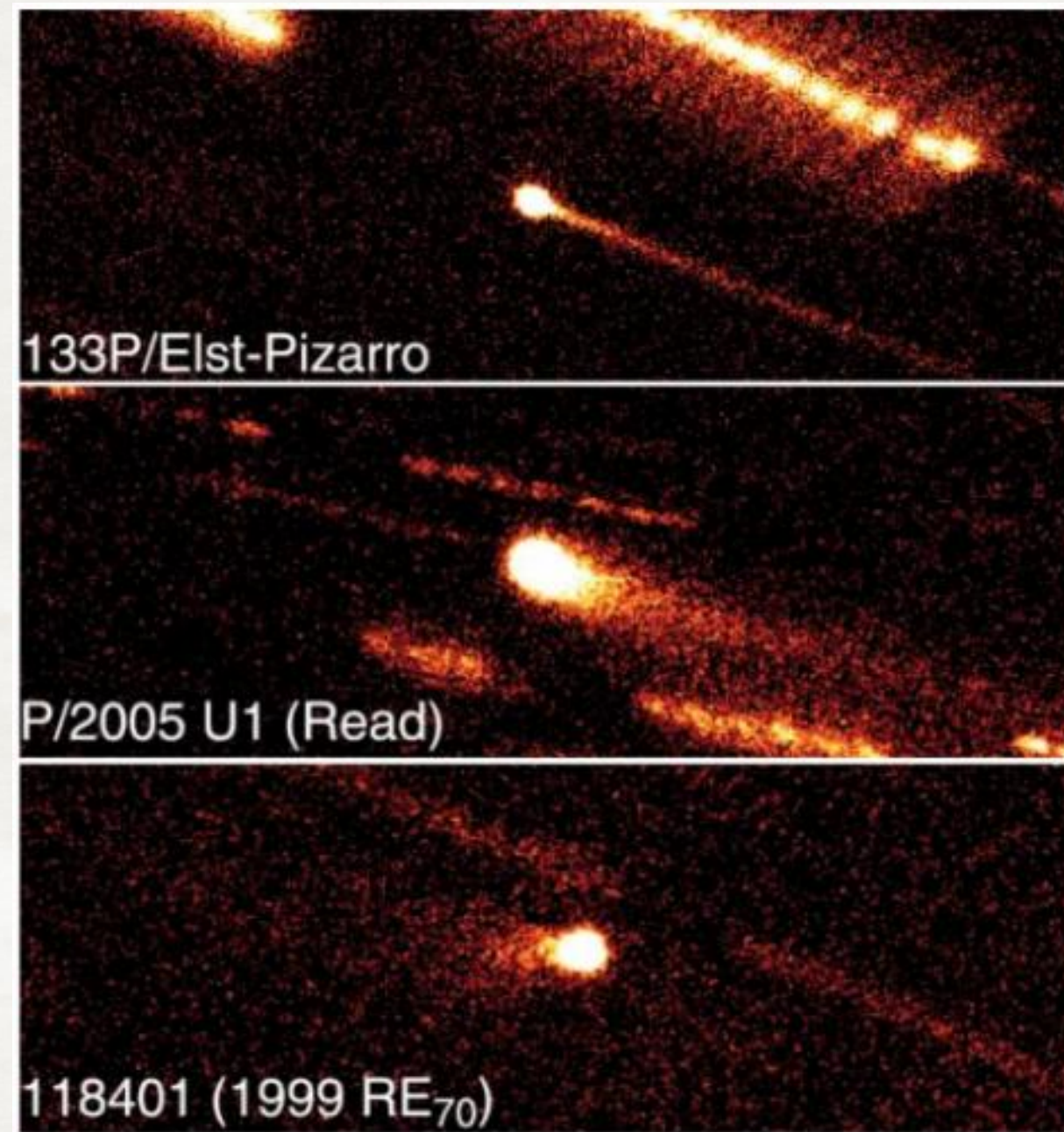


© Nicolas Lefaudeux

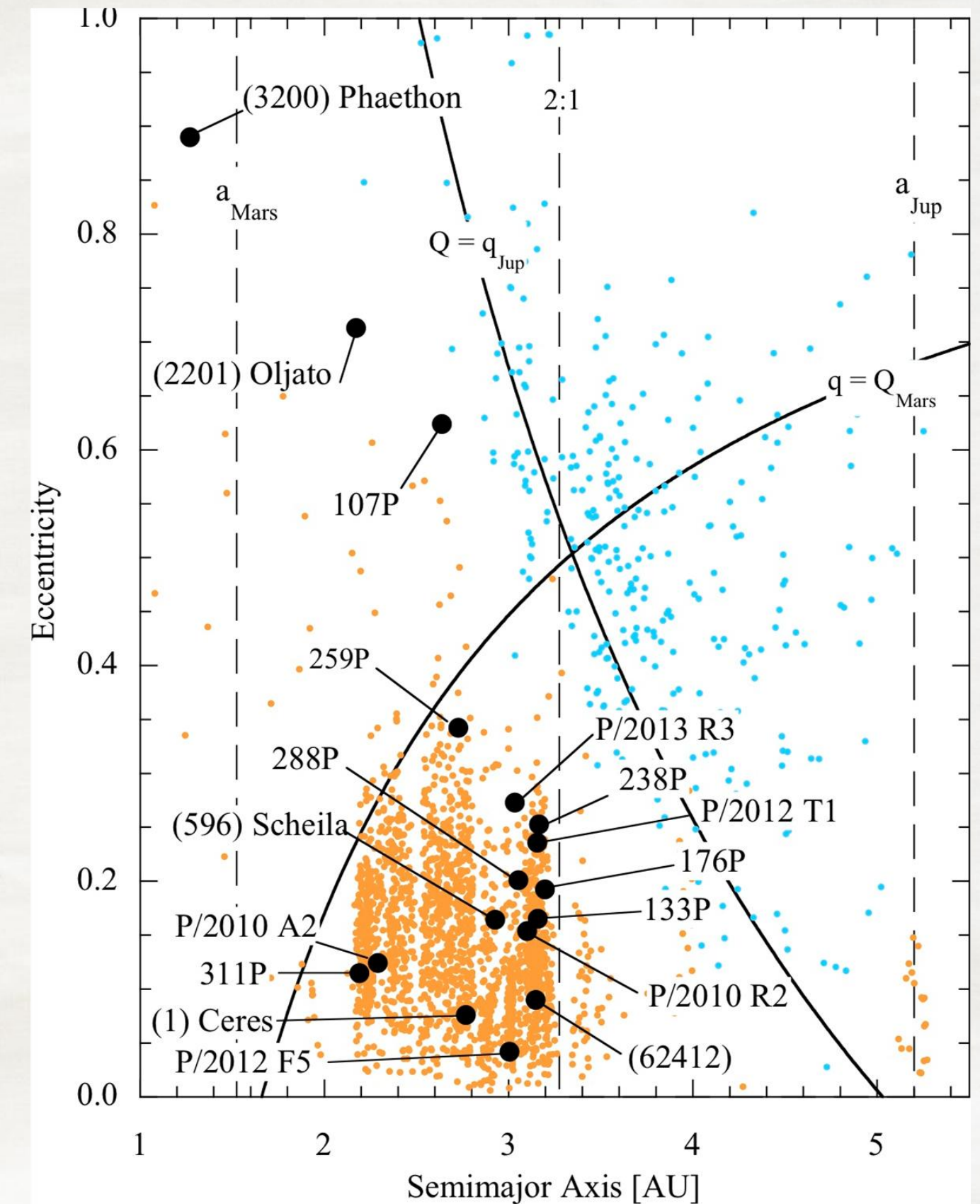
Evolução dos Cometas



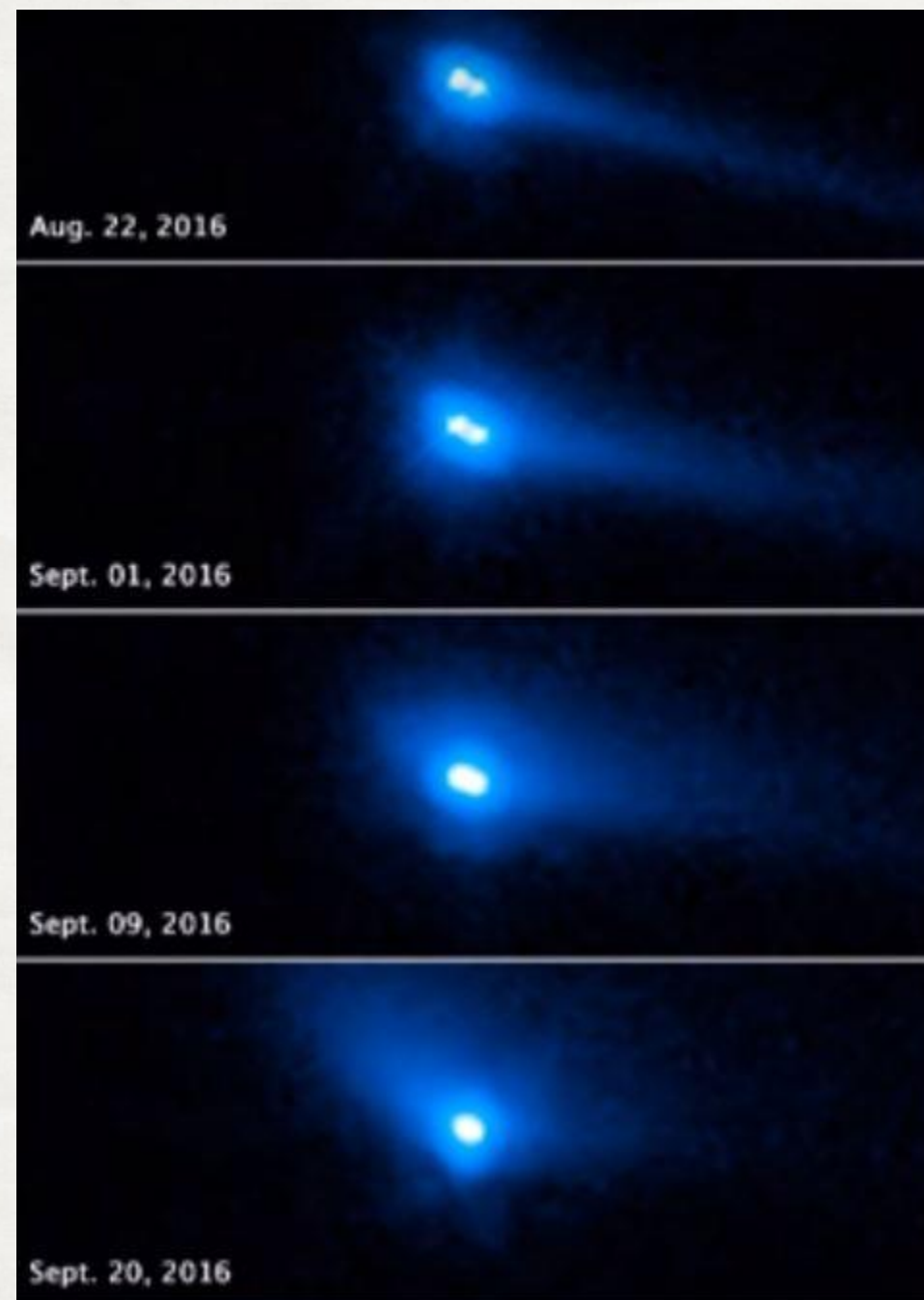
Cometas do cinturão principal/ Asteroides ativos



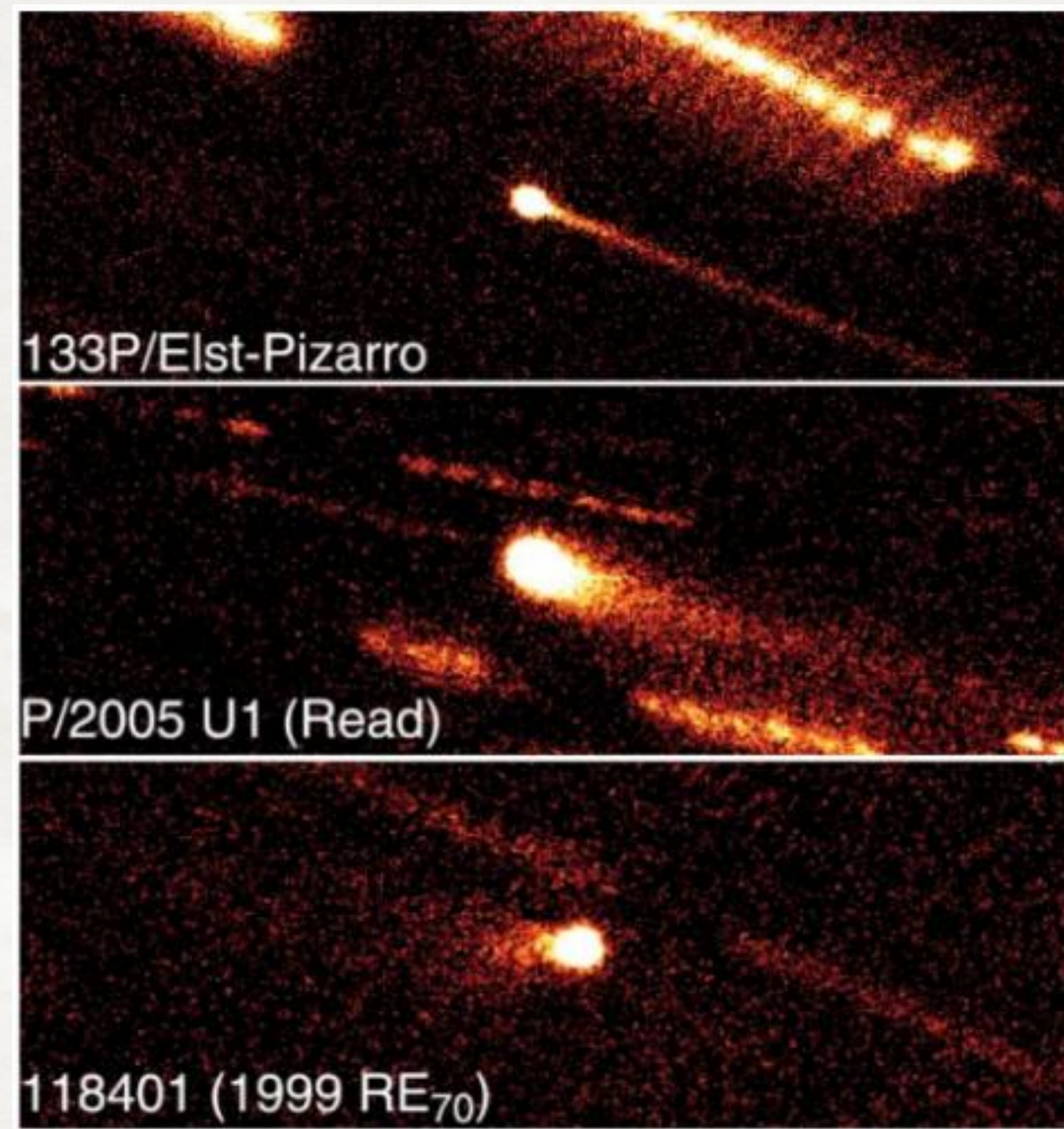
HSIEH & JEWITT, 2006



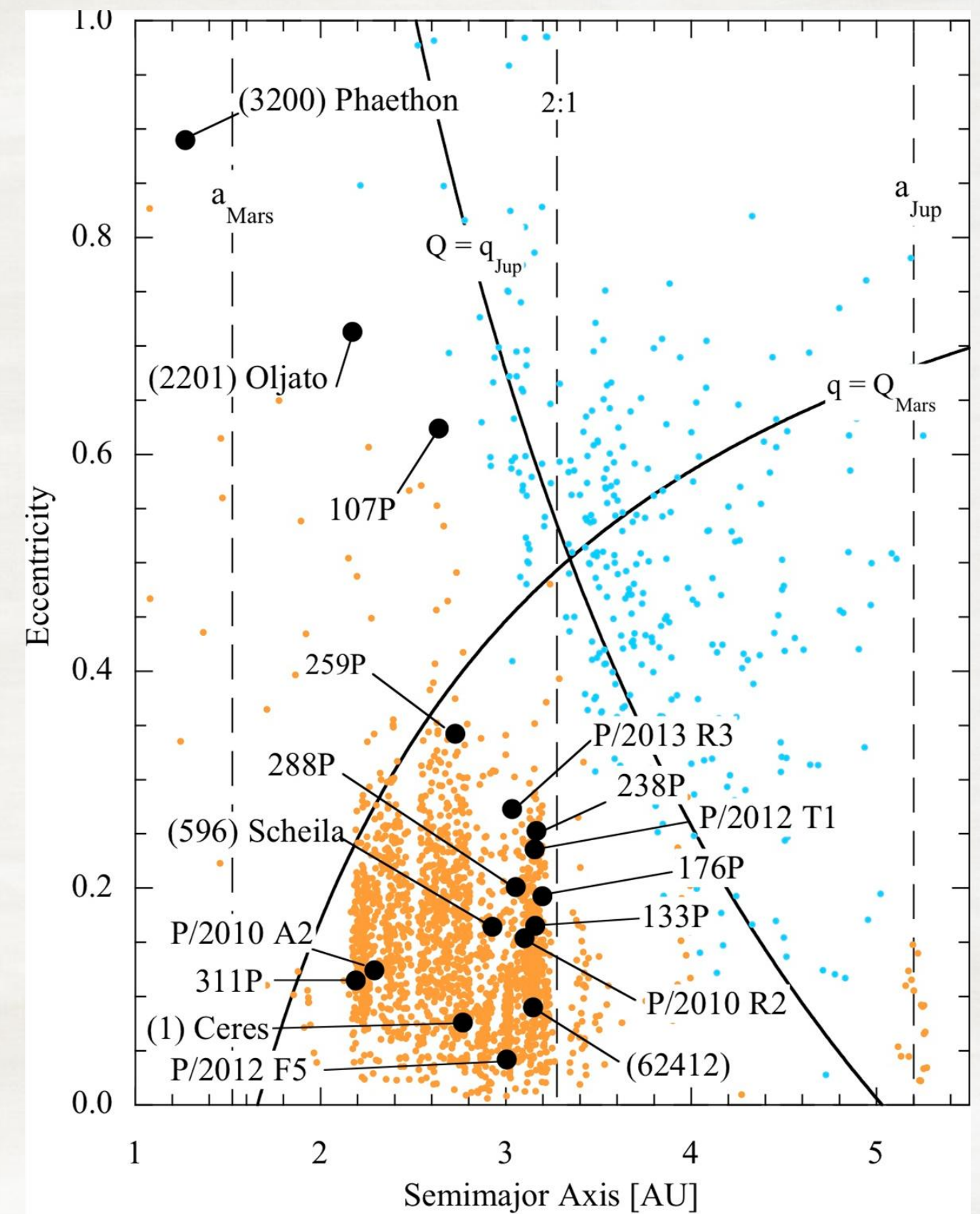
Cometas do cinturão principal/ Asteroides ativos



Agarwal et al. 2017

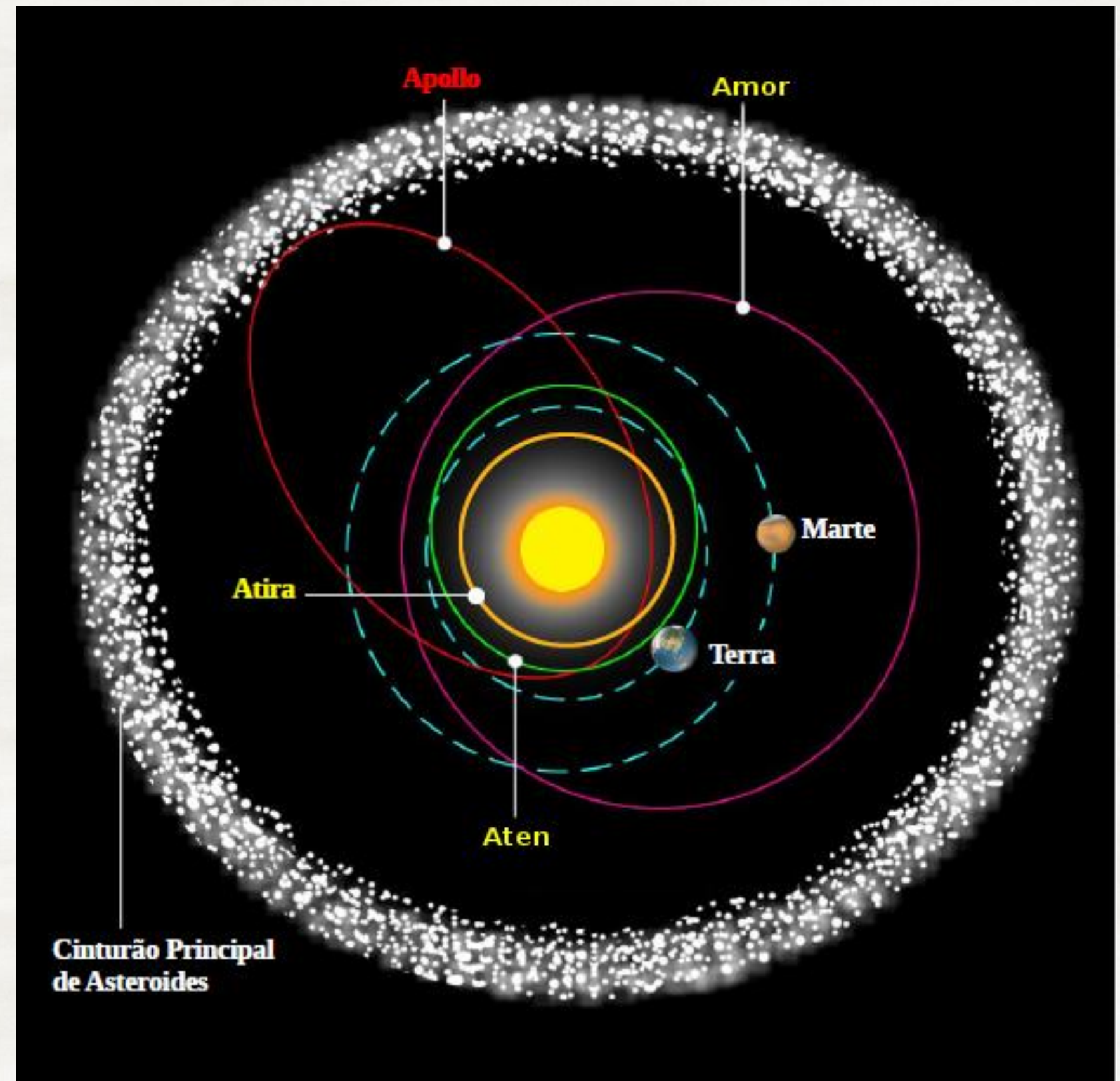


HSIEH & JEWITT, 2006



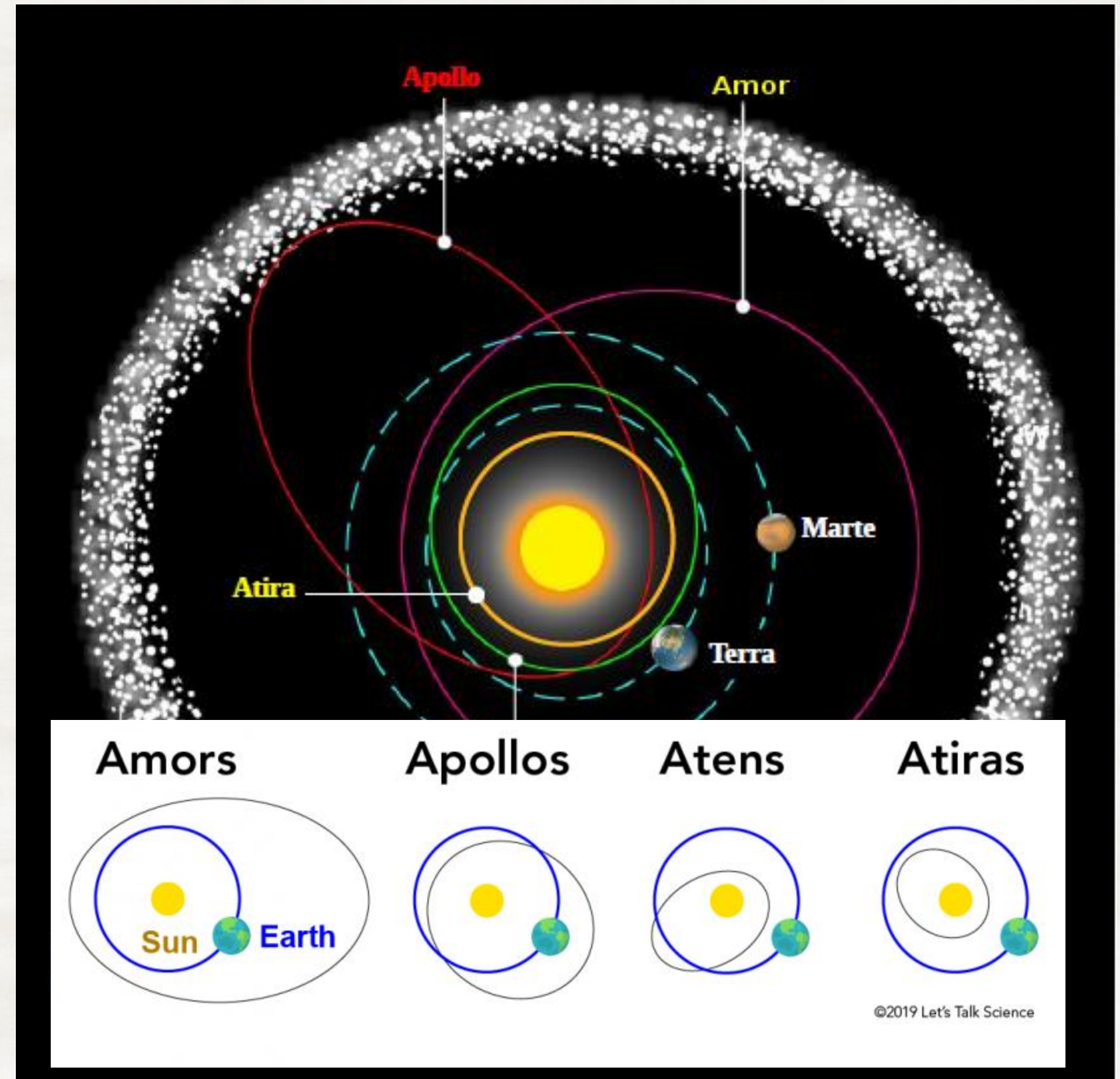
População de NEOs

- ❑ Até Outubro de 2021, foram descobertos 26,957 **Asteroides próximos da Terra (NEO)**. São objetos com $q < 1.3$ UA.
- 26 Atiras, 2,080 Aten, 9,878 Amor e 14,973 Apollo.
- 2,214 do quais são também classificados com **Asteroides potencialmente perigosos (PHA)**.
- ❑ Menos de 10% tem alguma propriedade física conhecida.



População de NEOs

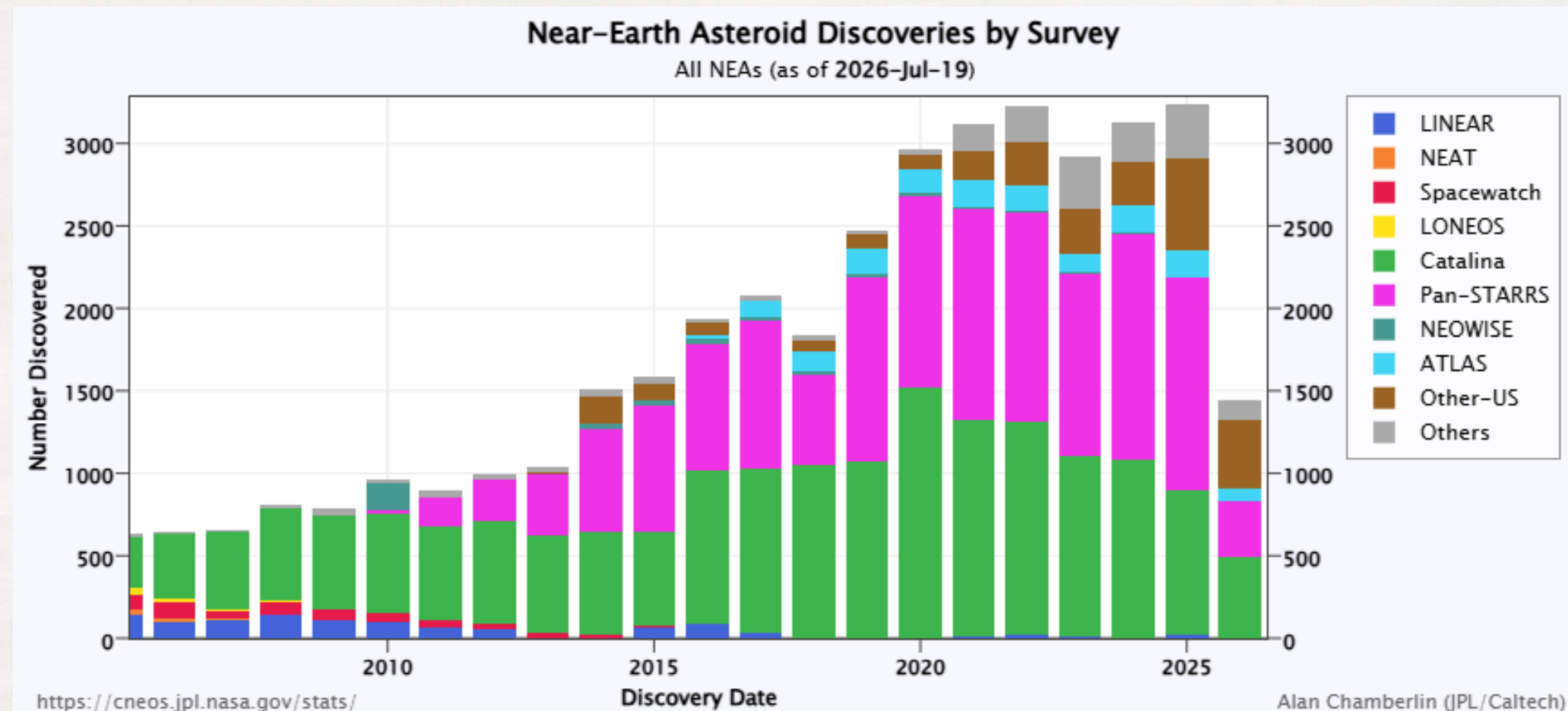
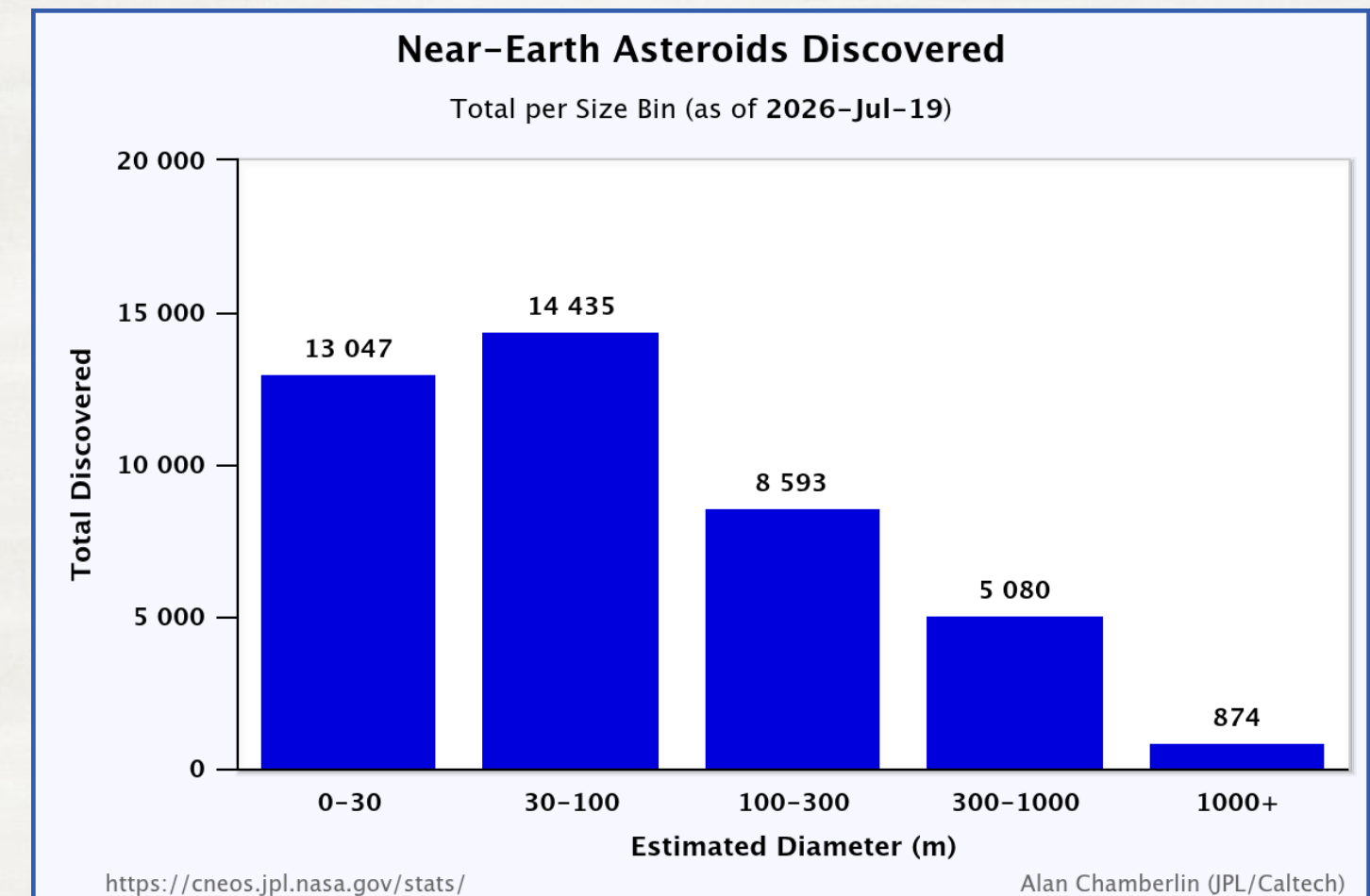
- Até Outubro de 2021, foram descobertos 26,957 **Asteroides próximos da Terra (NEO)**. São objetos com $q < 1.3$ UA.
- 26 Atiras, 2,080 Aten, 9,878 Amor e 14,973 Apollo.
- 2,214 do quais são também classificados com **Asteroides potencialmente perigosos (PHA)**.
- Menos de 10% tem alguma propriedade física conhecida.



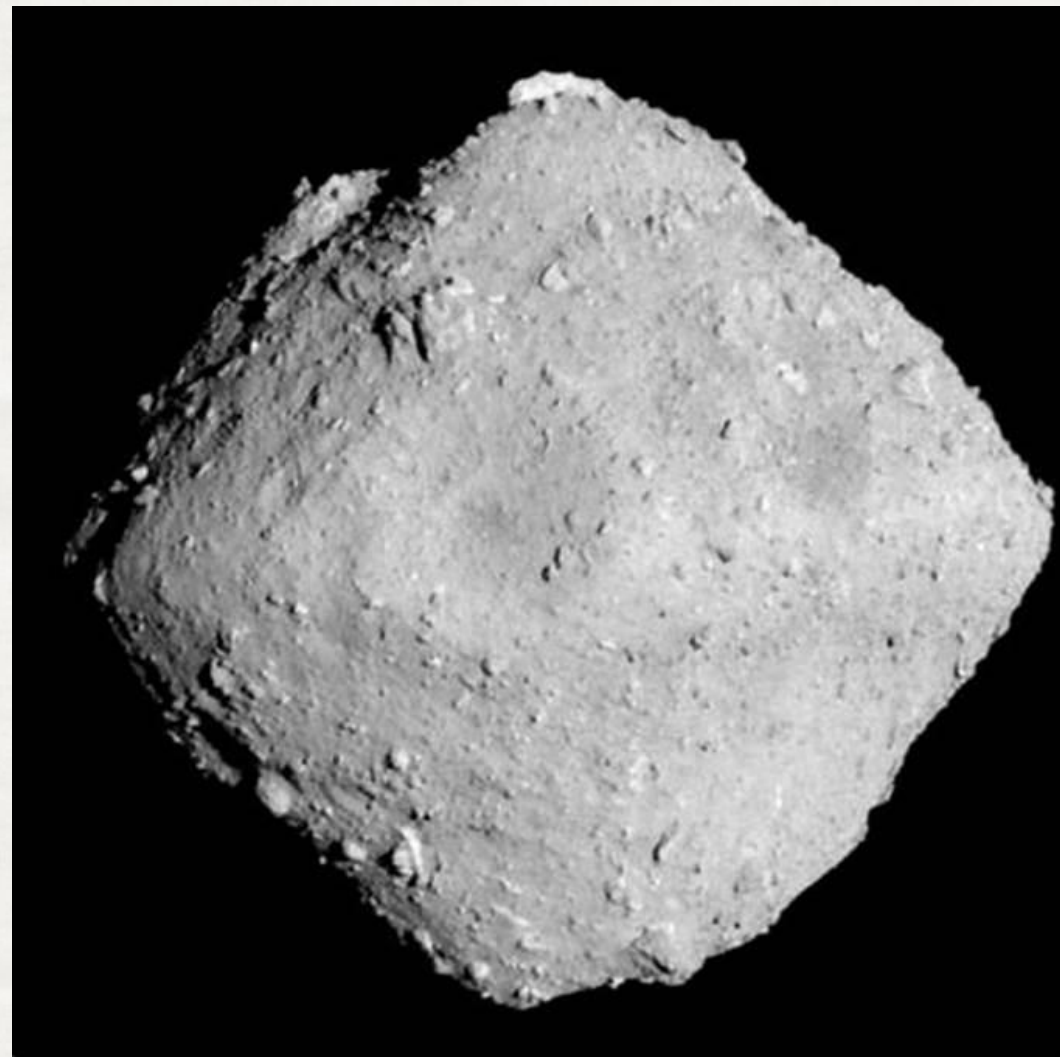
População de NEOs

- Até Outubro de 2021, foram descobertos 26,957 Asteroides próximos da Terra (NEO).
- 26 Atras, 2,080 Aten, 9,878 Amor e 14,973 Apollo.
- 2,214 do quais são também classificados com Asteroides potencialmente perigosos (PHA).
- Menos de 10% tem alguma propriedade física conhecida.

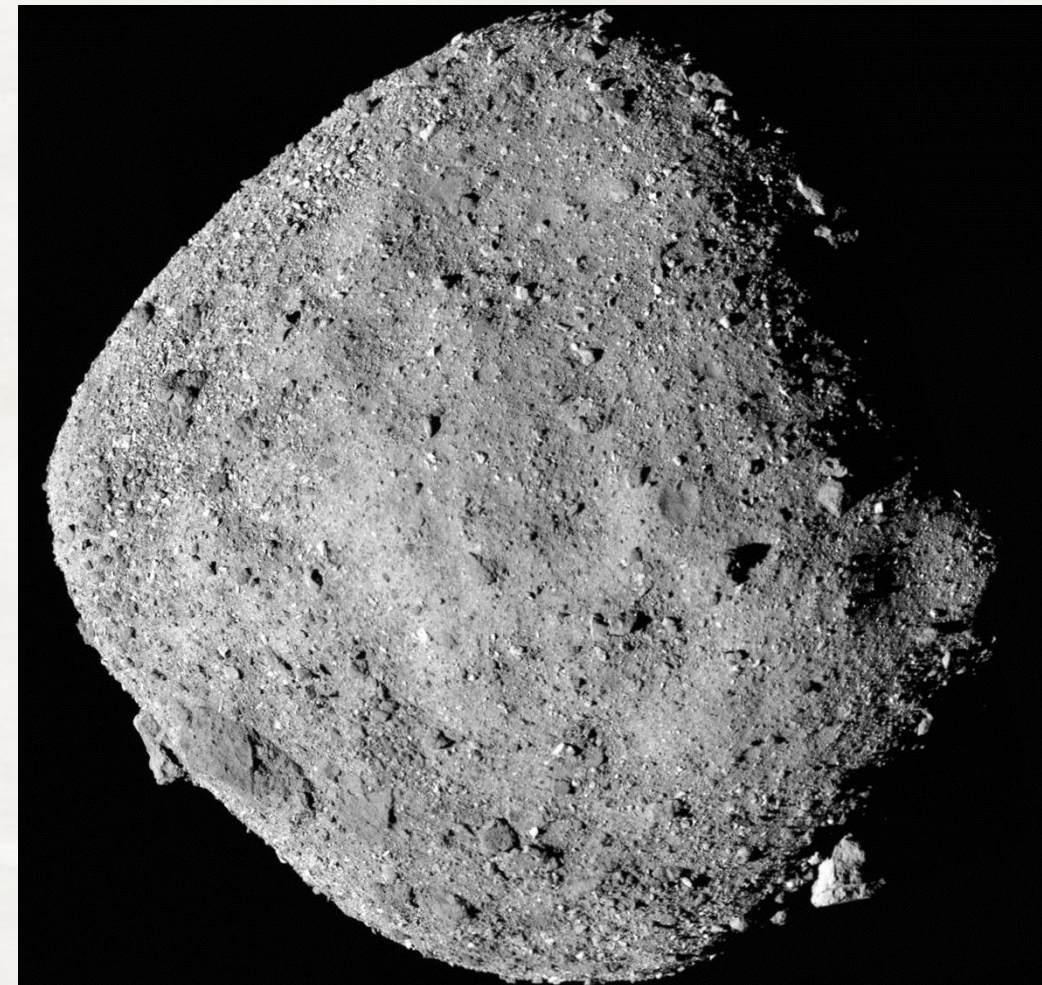
Taxa de descoberta > 6 objetos/noite (cerca de 2500 objetos/ano).



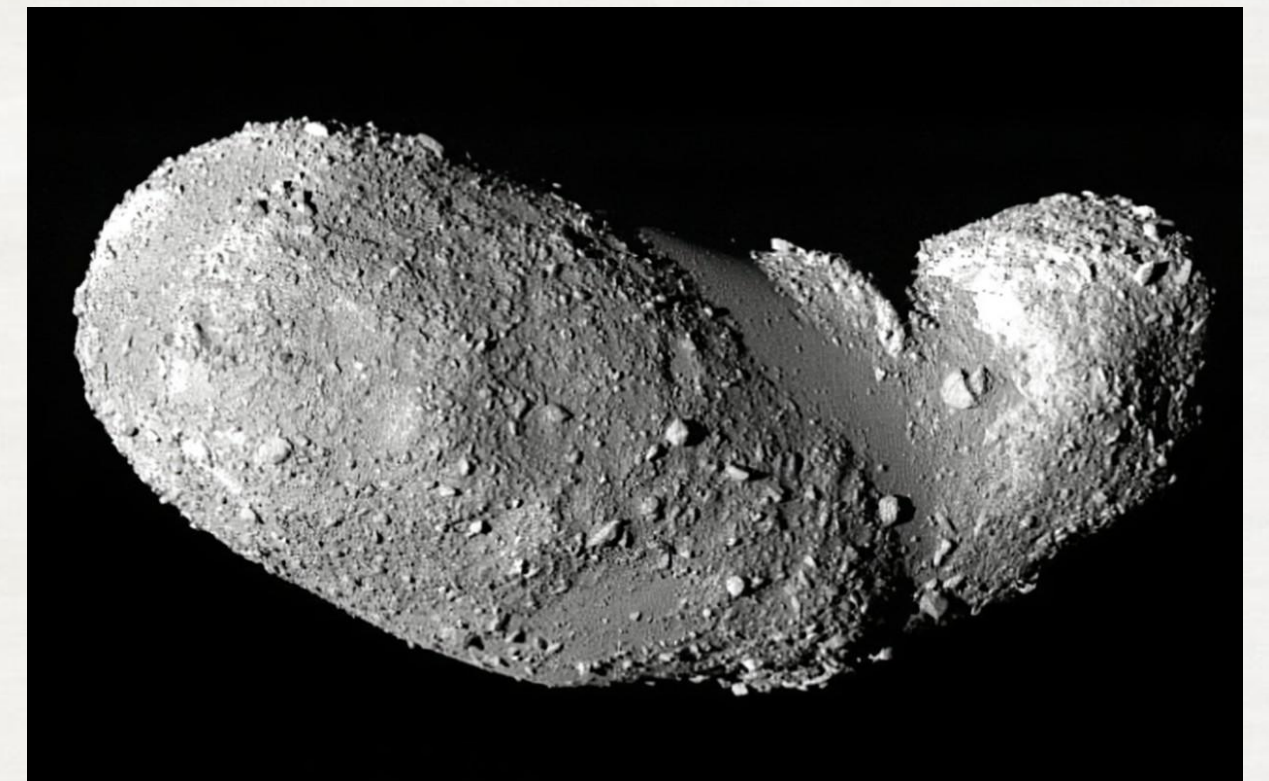
NEOs visitados por sondas



Ryugu, Hayabusa 2 da JAXA



Bennu, OSIRIS-Rex/NASA



Itokawa, Hayabusa 1 - JAXA



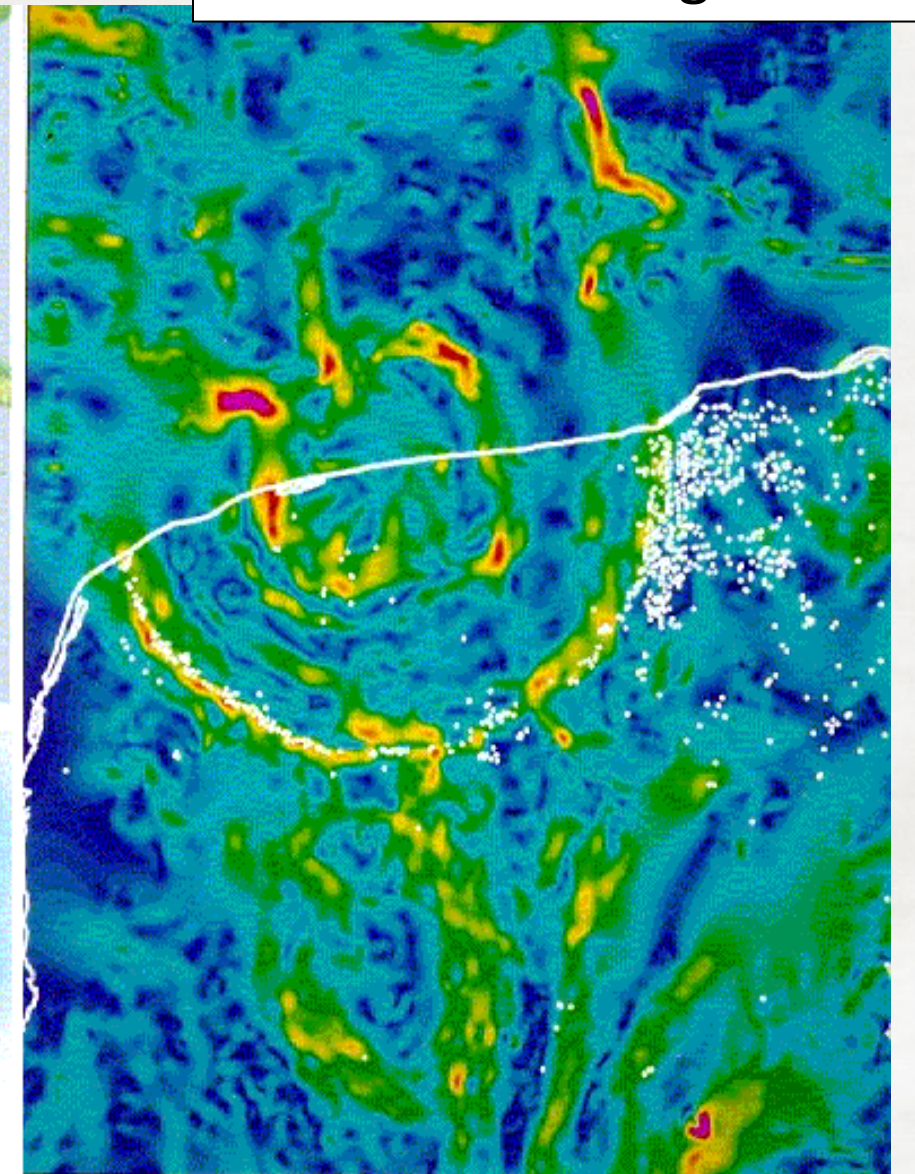
Eros, Shoemaker/NASA

Riscos para a vida na Terra

Tunguska, Russia, 1908, cerca de 12 Mt – 30 bombas de Hiroshima.



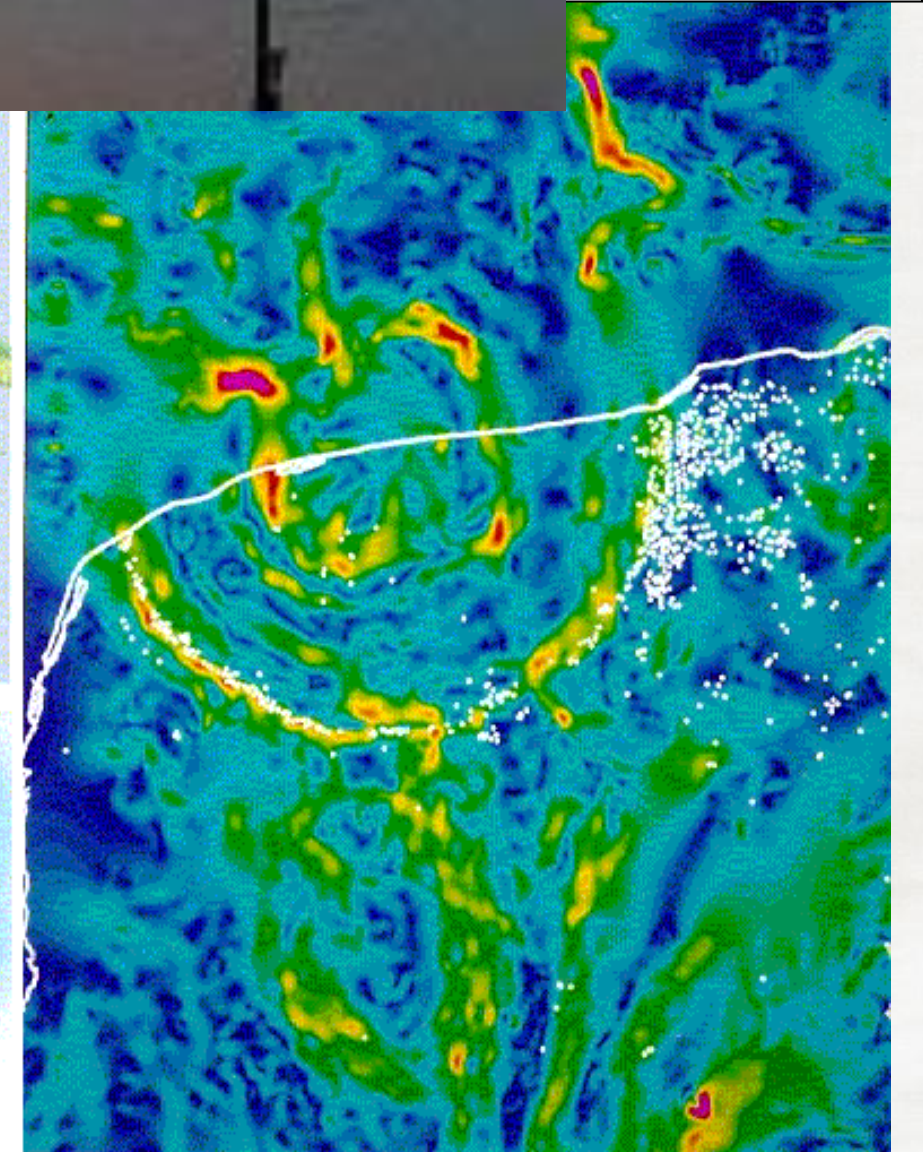
Yucatàn, Mexico, 65 million of Years ago



Chelyabinsk, Russia, 2013/02/15, cerca de 500 kt



Mexico, 65
years ago



Chelyabinsk, Russia, 2013/02/15, cerca de 500 kt

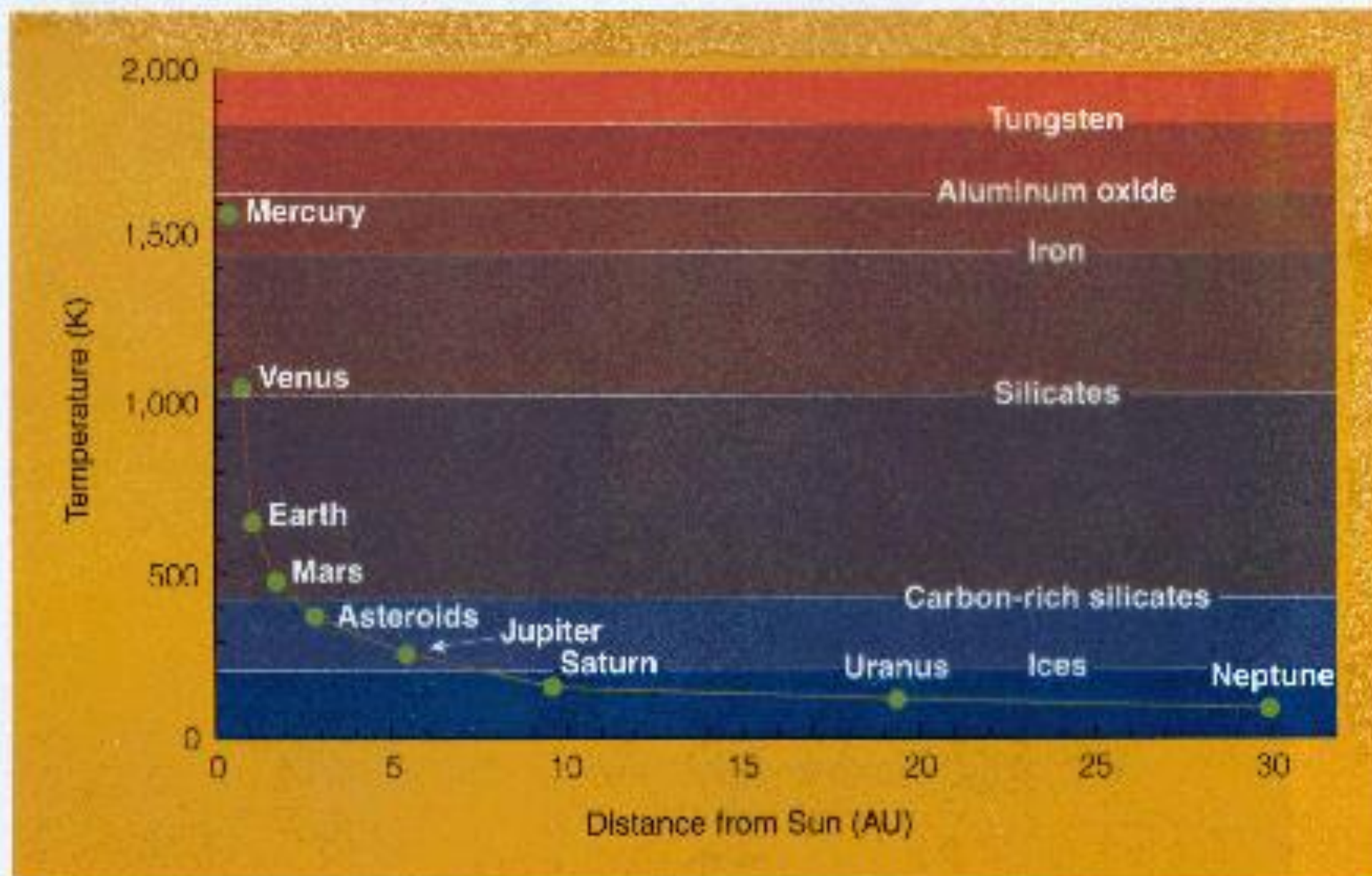


Mexico, 65
years ago



Origem da Água na Terra

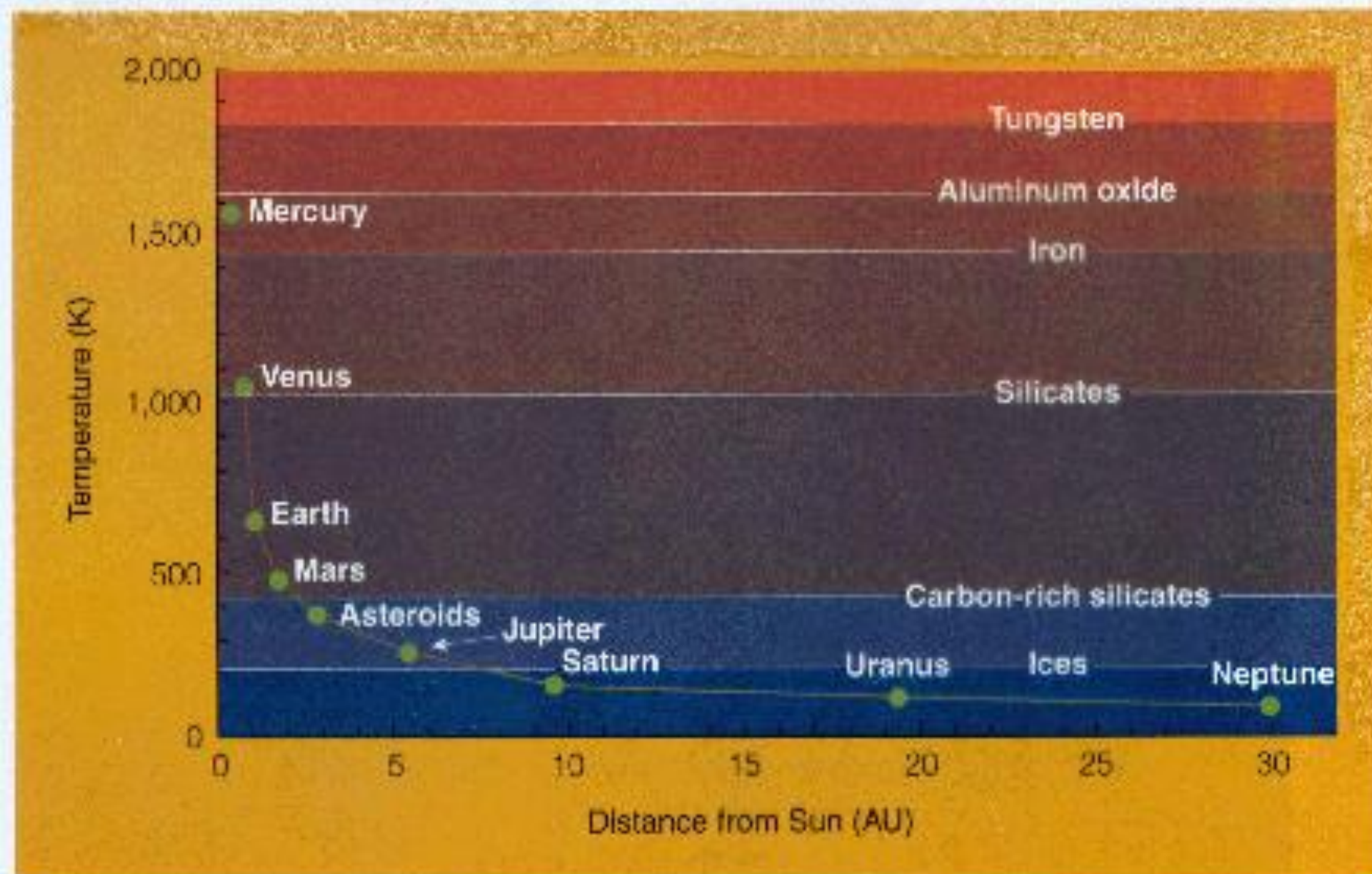
Condensation of different chemicals



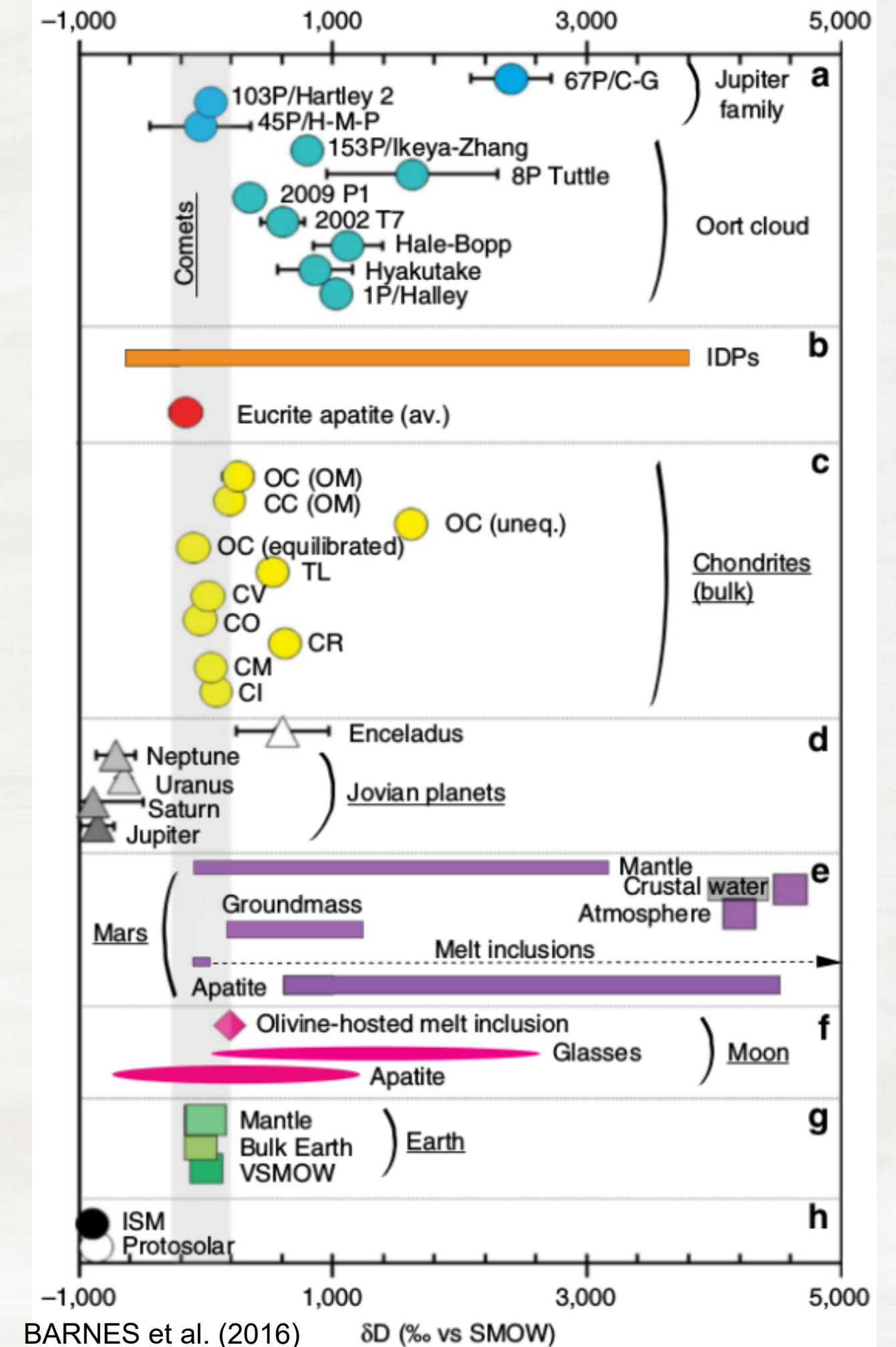
DeMeo, 2010

Origem da Água na Terra

Condensation of different chemicals



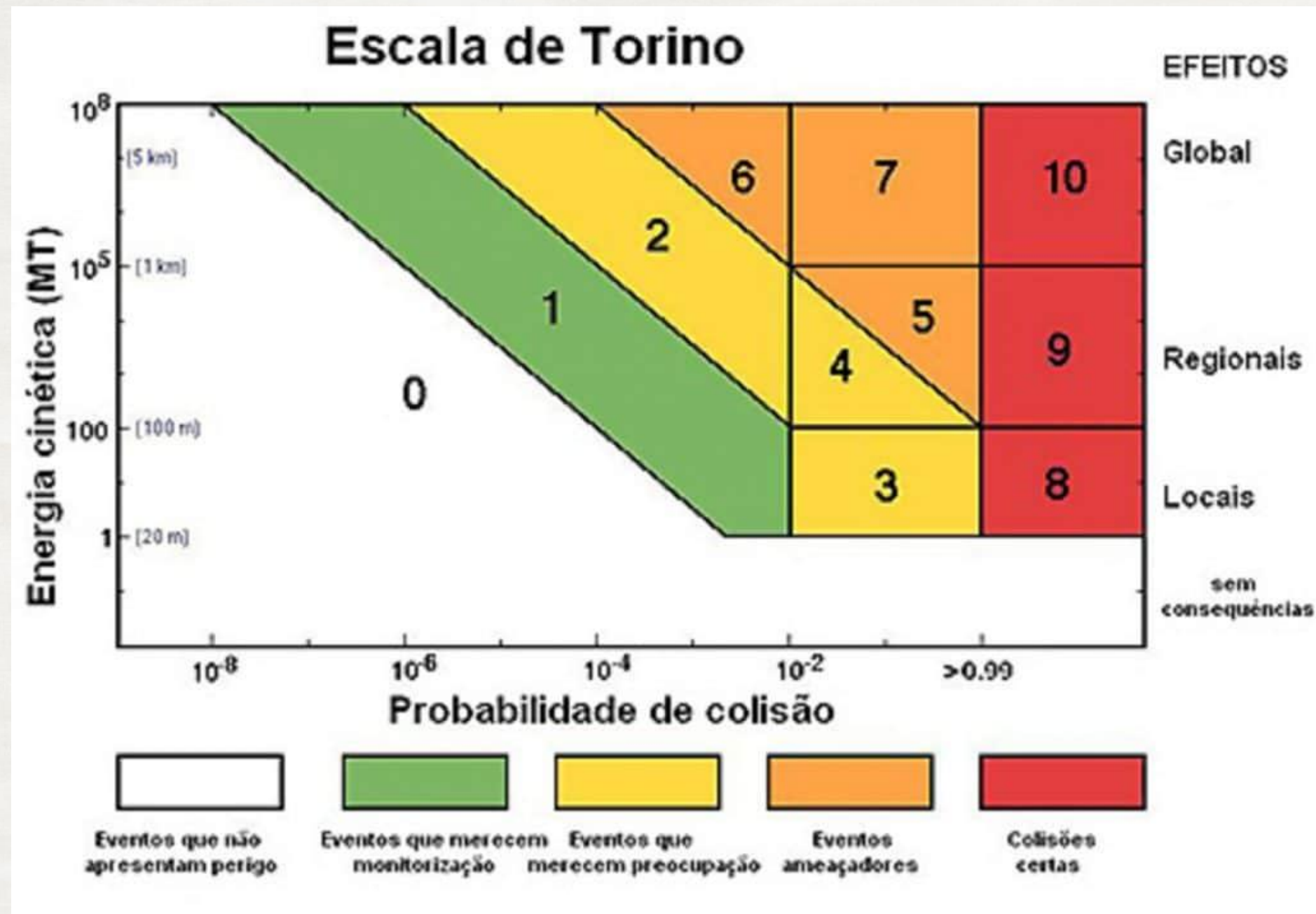
DeMeo, 2010



BARNES et al. (2016)

δD (‰ vs SMOW)

Riscos para a vida na Terra



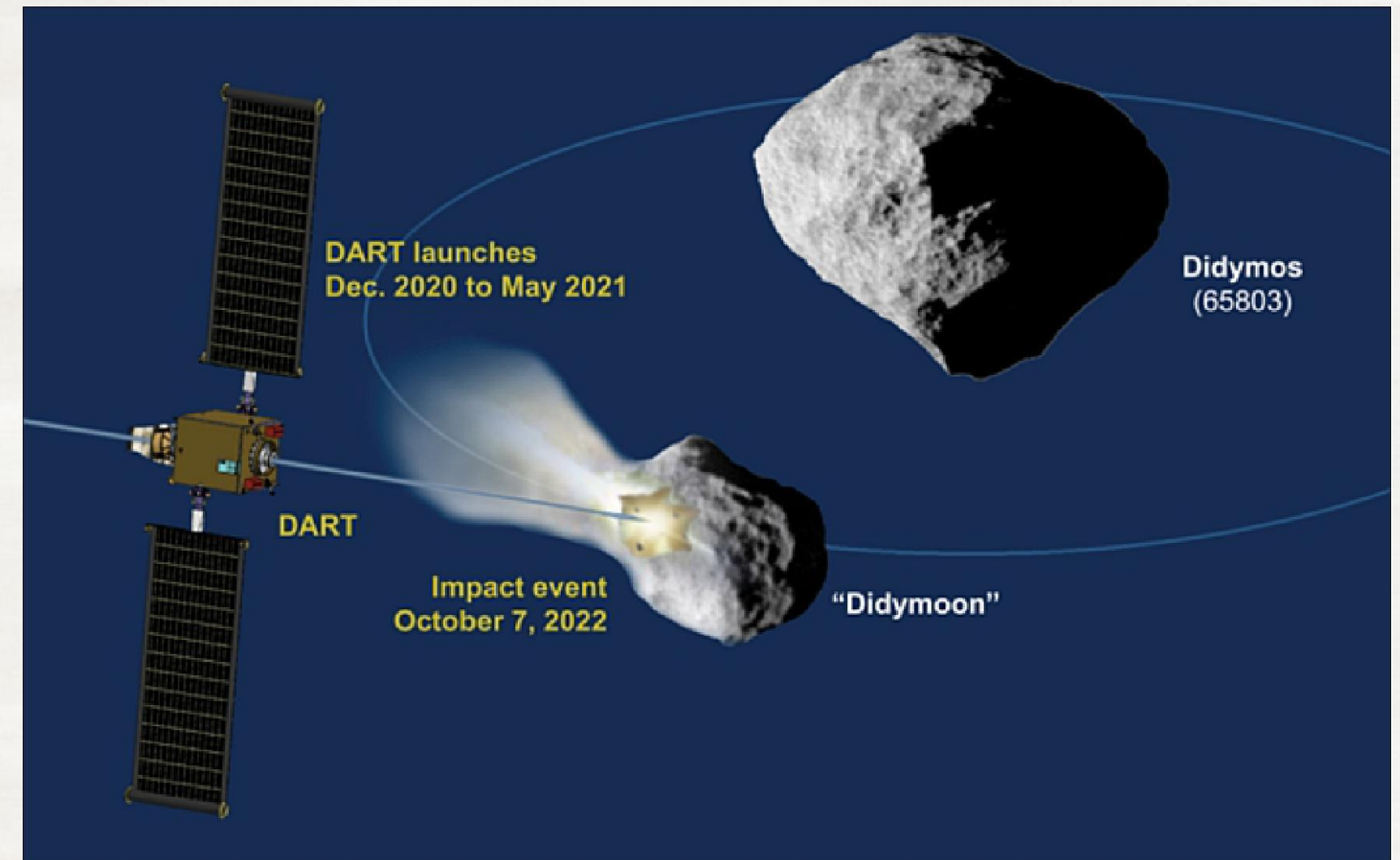
Variáveis: Cruza a probabilidade de colisão com a energia do impacto.

- Branco (Nota 0): Risco zero. Objeto queimar-se-á na atmosfera ou errará a Terra.
- Verde (Nota 1): Normal. Passagem próxima, mas sem perigo real.
- Amarelo (Notas 2-4): Atenção dos astrônomos. Requer monitoramento.
- Laranja (Notas 5-7): Ameaça séria. Encontros perigosos com grande chance de colisão.
- Vermelho (Notas 8-10): Colisões certas. Capazes de causar destruição local, regional ou global.

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

Estratégica de Mitigação

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

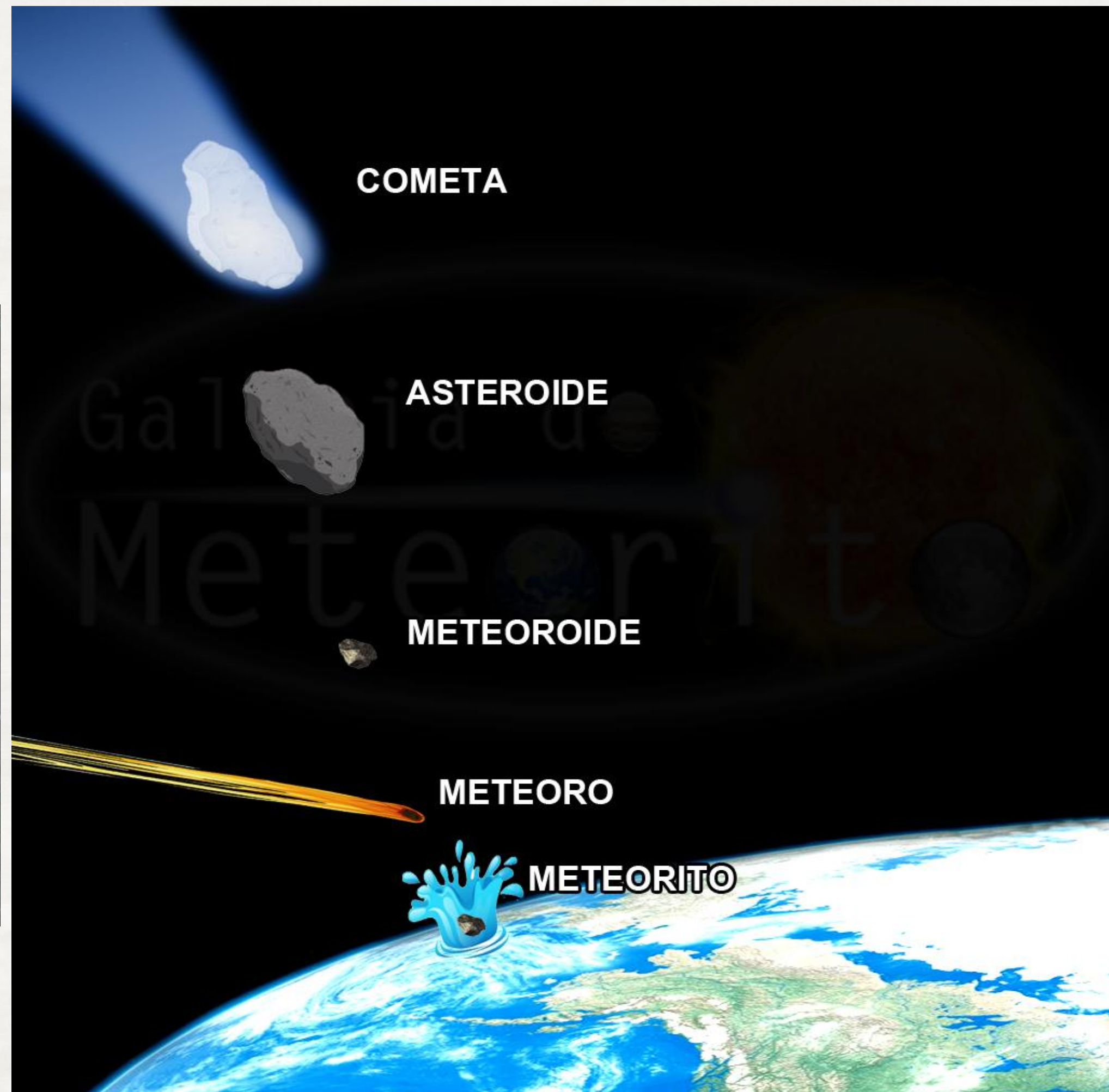


$$\Delta p = m_e v_e + m_p v_p$$

Conservação do momento Linear



Asteroides, meteoros, meteoritos



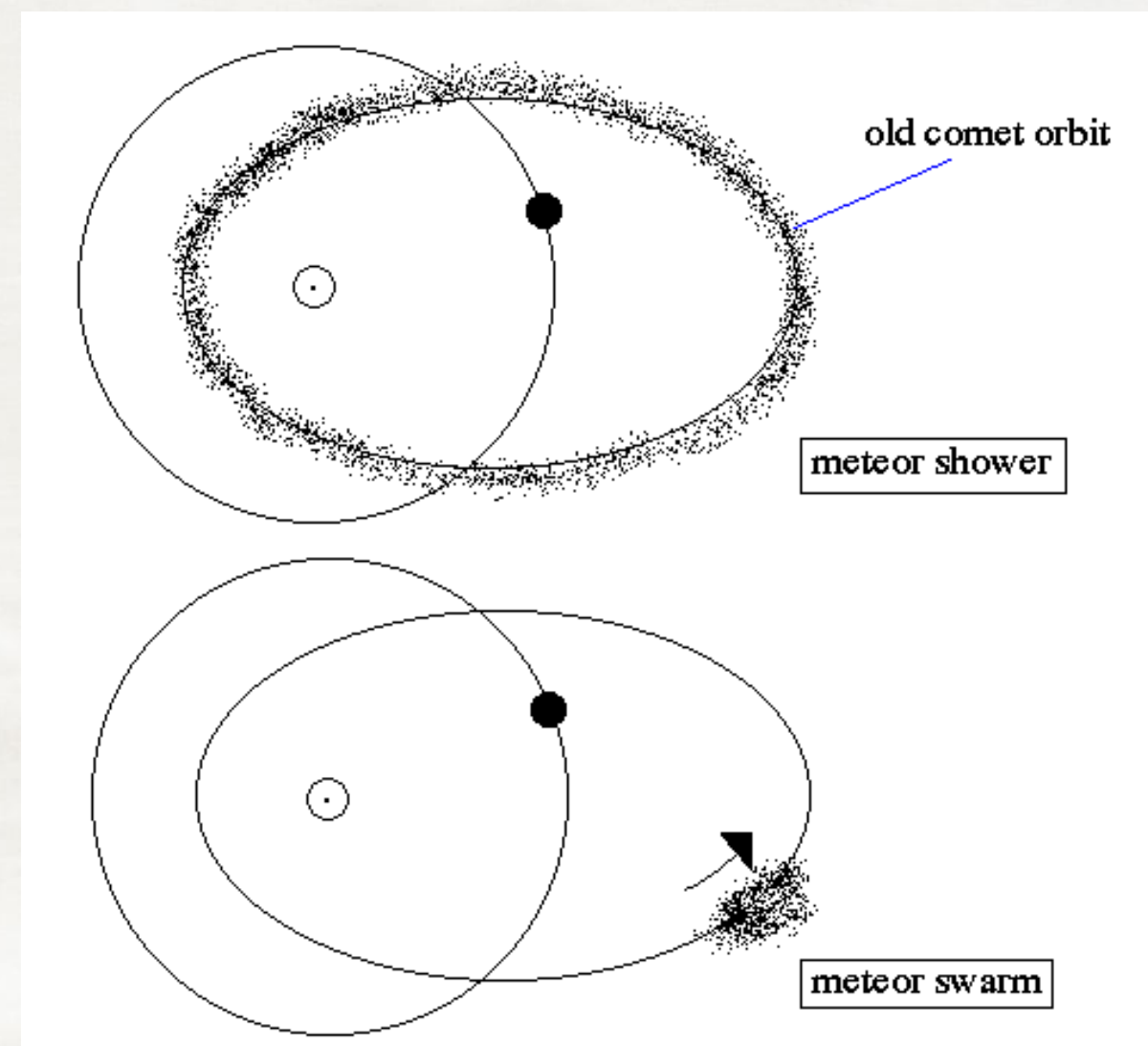
Asteroides, meteoros, meteoritos



Imagem: Chuva de meteoros Orionídeas, Foto: Nasa/Divulgação/Agência Brasil

Meteoros se originam a partir de meteoroides

- Pequenos fragmentos de asteroides
- Correntes de meteoroides associadas a resíduos de cometas (chuvas de meteoros)



Meteoritos – Fragmentos de asteroides



Meteorito Erg Chech 002

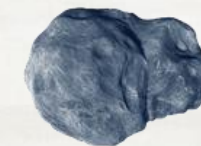


Meteorito Allende

O meteorito Allende é fundamental para datar o Sistema Solar porque contém os materiais mais antigos já formados em nosso sistema planetário. Essas inclusões ricas em cálcio e alumínio (CAIs) têm cerca de 4,56 bilhões de anos e trazem pistas cruciais sobre os primeiros estágios de formação do nosso sistema.

Meteorito Bendegó





Obrigado!

Email: filipeastro@on.br

