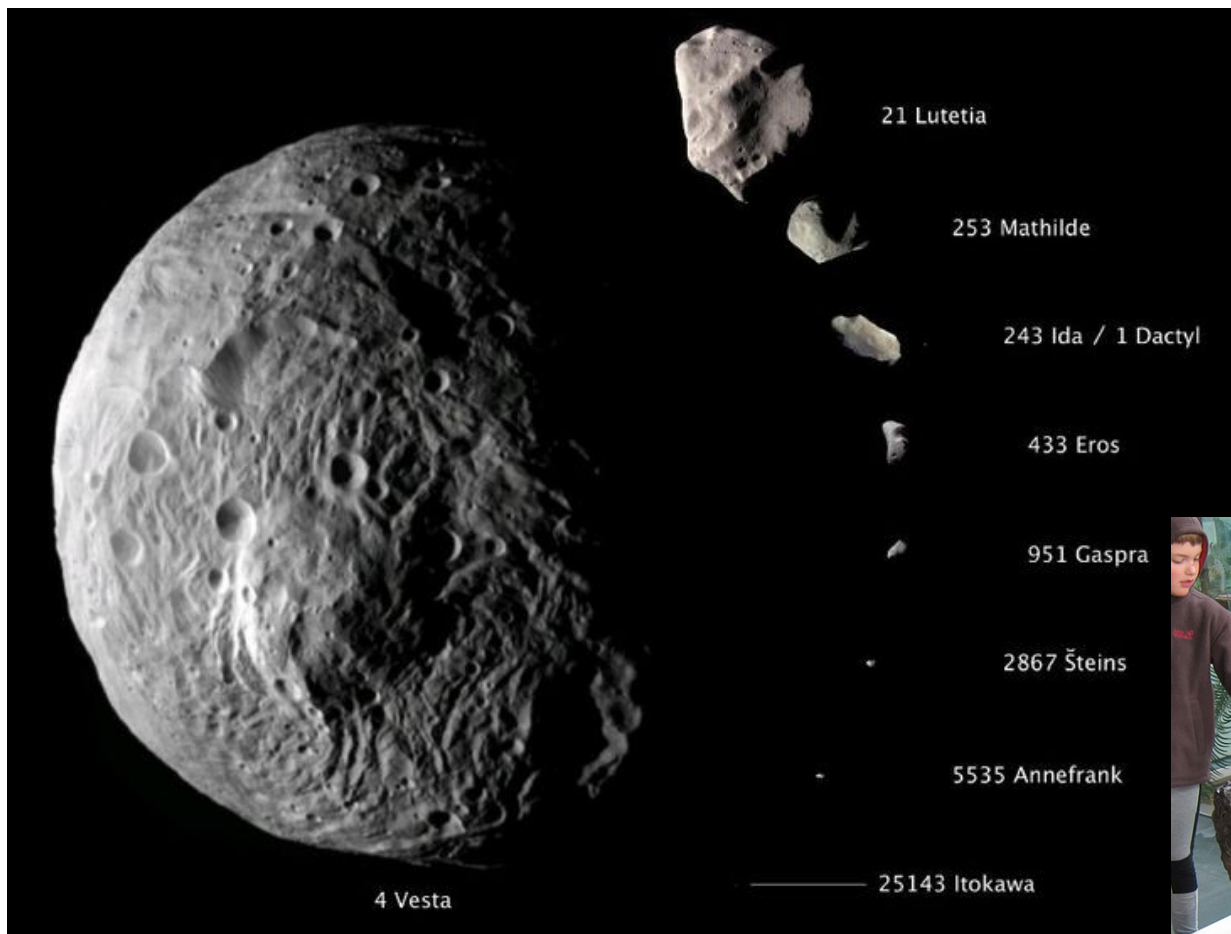


# 10. Asteroides e Meteoritos



Asteroides

Meteoritos

# Relação de Titius-Bode (1772)

(c) Introduction to Planetary Science,  
the Geological Perspective

$$a = 0.4 + 0.3 \times 2^n$$

$$n = -\infty, 0, 1, 2, \dots$$

Table 3.2. Average radii of planetary orbits compared to values predicted by the Titius-Bode published in 1772

Em 1772 foi proposta uma relação empírica para a distância entre os planetas e o Sol

n	Planet	Avg. radius of orbit, AU	Titius-Bode radius, AU	Year of discovery
$-\infty$	Mercury	0.39	0.4	antiquity
0	Venus	0.72	0.7	antiquity
1	Earth	1.00	1.0	antiquity
2	Mars	1.52	1.6	antiquity
4	Jupiter	5.20	5.2	antiquity
5	Saturn	9.56	10.0	antiquity

\* Pluto was reclassified as a dwarf planet in August of 2006.

# Relação de Titius-Bode (1772)

(c) Introduction to Planetary Science,  
the Geological Perspective

$$a = 0.4 + 0.3 \times 2^n$$

$$n = -\infty, 0, 1, 2, \dots$$

Table 3.2. Average radii of planetary orbits compared to values predicted by the Titius-Bode published in 1772

Após a descoberta acidental de **Urano**, que se encaixou na relação ( $n = 6$ ), foi procurado um planeta para  $n = 3$

n	Planet	Avg. radius of orbit, AU	Titius-Bode radius, AU	Year of discovery
$-\infty$	Mercury	0.39	0.4	antiquity
0	Venus	0.72	0.7	antiquity
1	Earth	1.00	1.0	antiquity
2	Mars	1.52	1.6	antiquity
3				
4	Jupiter	5.20	5.2	antiquity
5	Saturn	9.56	10.0	antiquity
6	Uranus	19.22	19.6	1781
7				

\* Pluto was reclassified as a dwarf planet in August of 2006.

# Relação de Titius-Bode (1772)

$$a = 0.4 + 0.3 \times 2^n$$

$$n = -\infty, 0, 1, 2, \dots$$

(c) Introduction to Planetary Science,  
the Geological Perspective

Table 3.2. Average radii of planetary orbits compared to values predicted by the Titius-Bode published in 1772

Foi descoberto um objeto (o asteroide Ceres) para  $n = 3$ , mas corpos descobertos depois (Netuno e Plutão) não se encaixam

$n$	Planet	Avg. radius of orbit, AU	Titius-Bode radius, AU	Year of discovery
$-\infty$	Mercury	0.39	0.4	antiquity
0	Venus	0.72	0.7	antiquity
1	Earth	1.00	1.0	antiquity
2	Mars	1.52	1.6	antiquity
3	Ceres	2.77	2.8	1801
4	Jupiter	5.20	5.2	antiquity
5	Saturn	9.56	10.0	antiquity
6	Uranus	19.22	19.6	1781
7	Neptune	30.11	38.8	1846
8	Pluto*	39.54	77.2	1930

\* Pluto was reclassified as a dwarf planet in August of 2006.

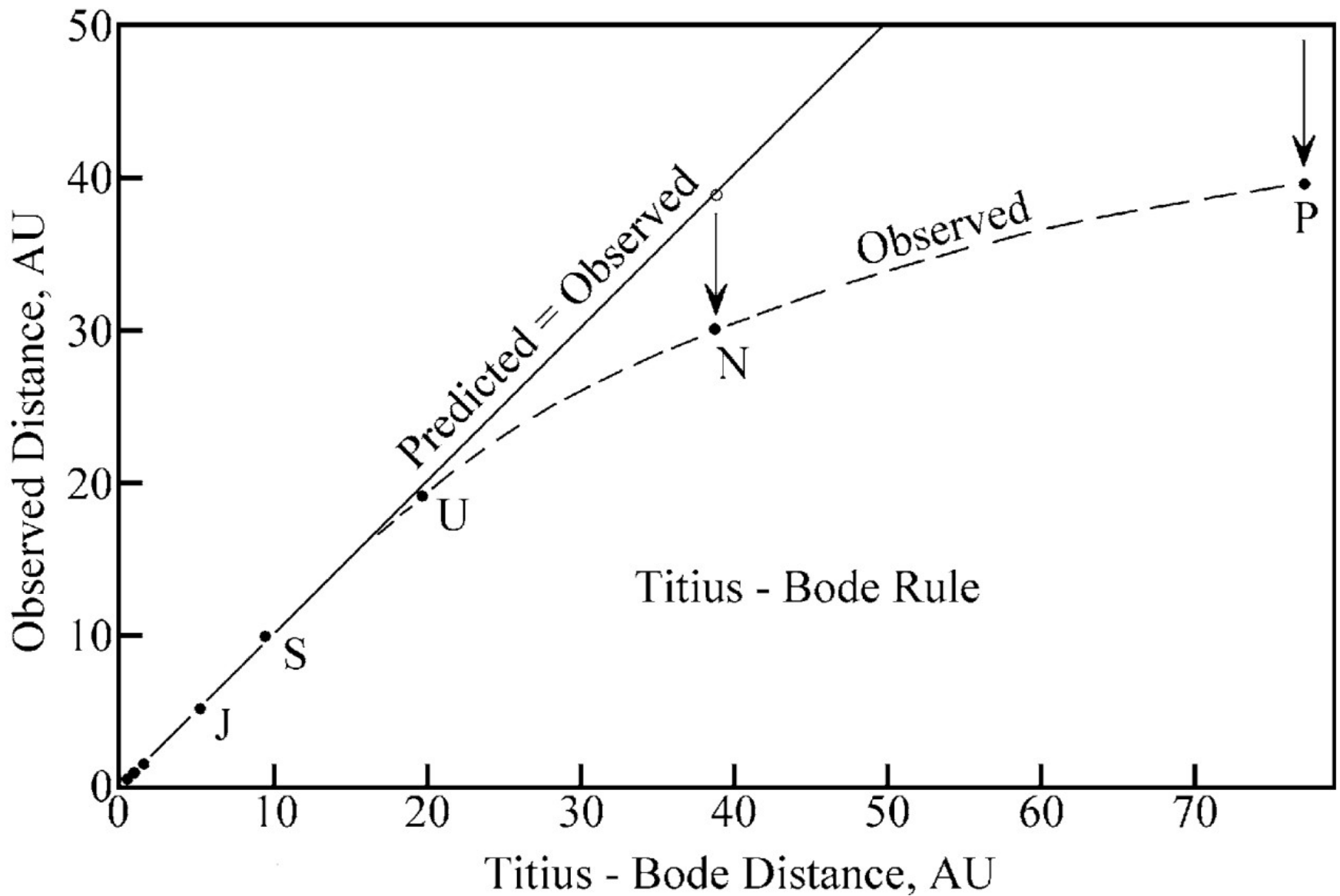


Figure 3.2. The observed radii of the orbits of the terrestrial planets (Mercury, Venus, Earth, Mars, and Ceres) as well as those of Jupiter and Saturn agree with the distances predicted by the Titius-Bode rule. However, the observed average radii of the orbits of Uranus, Neptune, and of the dwarf planet Pluto are progressively shorter than the radii predicted by the Titius-Bode rule

# Nomenclatura

Antigamente: nome e atribuído um símbolo, p. ex. **Flora** ♀ ♀

Atualmente: número após confirmar órbita e nome (opcional)

Asteroide		Símbolo
1 Ceres	♁ ♁ ♁	Foice de <b>Ceres</b> , revertida para dobrar como a letra C
2 Palas	♁ ♁ ♁	Lança de <b>Atena</b> (Palas)
3 Juno	♁ ♁ ♁	Uma estrela montada em um cetro, para <b>Juno</b> , a Rainha do Céu
4 Vesta	♁ ♁ ♁	O altar e o <b>fogo sagrado de Vesta</b>
5 Astreia	♁ ♁	Uma escala, ou uma âncora invertida, símbolos de <b>justiça</b>
6 Hebe	♁	Copo de <b>Hebe</b>
7 Iris	♁	Um arco-íris ( <i>íris</i> ) e uma estrela
8 Flora	♁ ♀	Uma flor ( <i>flora</i> ), especificamente a <b>Rosa da Inglaterra</b>
9 Metis	♁	O olho da <b>sabedoria</b> e uma estrela
10 Hígia	♁ ♁	A serpente e uma estrela de <b>Hígia</b> , ou o <b>bastão de Asclépio</b>

Asteroides recém descobertos: designação provisória.

Ano da descoberta + letra meio mês + letra ordem descoberta

Exemplo: **2001 AA**: 1º asteroide de 1 a 15/1/2001

## Brightest from Earth

Asteroid	Magnitude when brightest	Semi-major axis (AU)	Eccentricity of orbit	Diameter (km)	Year of discovery
4 Vesta	5.20	2.361	0.089172	529	1807
2 Pallas	6.49	2.773	0.230725	544	1802
1 Ceres	6.65	2.766	0.079905	952	1801
7 Iris	6.73	2.385	0.231422	200	1847
433 Eros	6.8	1.458	0.222725	34 × 11 × 11	1898
(153814) 2001 WN <sub>5</sub>	6.85	1.711	0.467207	0.93	2001
367943 Duende	7.04	0.910	0.089319	0.04 × 0.02	2012
6 Hebe	7.5	2.425	0.201726	186	1847

# Observações: A letra I não é usada

- Caso mais de 25 asteroides em meio mês → número (*subscript*) em múltiplos de 25

First letter

A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	-
Jan 1	Jan 16	Feb 1	Feb 16	Mar 1	Mar 16	Apr 1	Apr 16	May 1	May 16	Jun 1	Jun 16	Jul 1	Jul 16	Aug 1	Aug 16	Sep 1	Sep 16	Oct 1	Oct 16	Nov 1	Nov 16	Dec 1	Dec 16	-

Second letter

A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25

Subscript

none	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	...	n
0	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300		$25 * n$

Exemplo: 2015 OP<sub>56</sub>

O: asteroide descoberto na segunda metade de Julho

P56: É o objeto 1415 a ser descoberto nesse período.

$$1415 = 15 [P] + 25 * 56$$



Exemplo:



Astronomia USP Brasil  
@AstroUSP

11:27 AM · 14 de jun de 2021

Asteroide  
**2000 LE<sub>32</sub>**  
é o nome  
provisório  
do **asteroide**  
**30437**, que  
recebeu o  
nome  
**Michtchenko**  
em  
homenagem  
à Profa.  
Tatiana  
Michtchenko  
do IAG-USP

Parabéns à nossa Astrônoma Profa. Tatiana Michtchenko (IAG-USP). Em reconhecimento a seus estudos da evolução dinâmica dos asteroides, ela foi homenageada pelo "Working Group of Small Bodies Nomenclature", e passa a ter um asteroide com o seu nome: 30437 Michtchenko (2000 LE32)



O(A) descobridor(a) do asteroide pode sugerir o nome

## **Alguns astrônomos brasileiros homenageados**

3602: Daniela Lazzaro, astrônoma do ON

5201: Ferraz-Mello, astrônomo IAG-USP

10696: Giuliatti Winter, UNESP Guaratinguetá

10697: Othon Winter, UNESP Guaratinguetá

22454: Rosaly Lopes, NASA

30437: Tatiana Michtchenko, IAG-USP



**Astrônomo belga Henri Debehogne já homenageou o Brasil:**

**4123: Tarsila do Amaral** (descoberto em 1986)

Outras homenagens: 17473 FreddieMercury (1991 FM3)

# Progressão exponencial na descoberta de asteroides

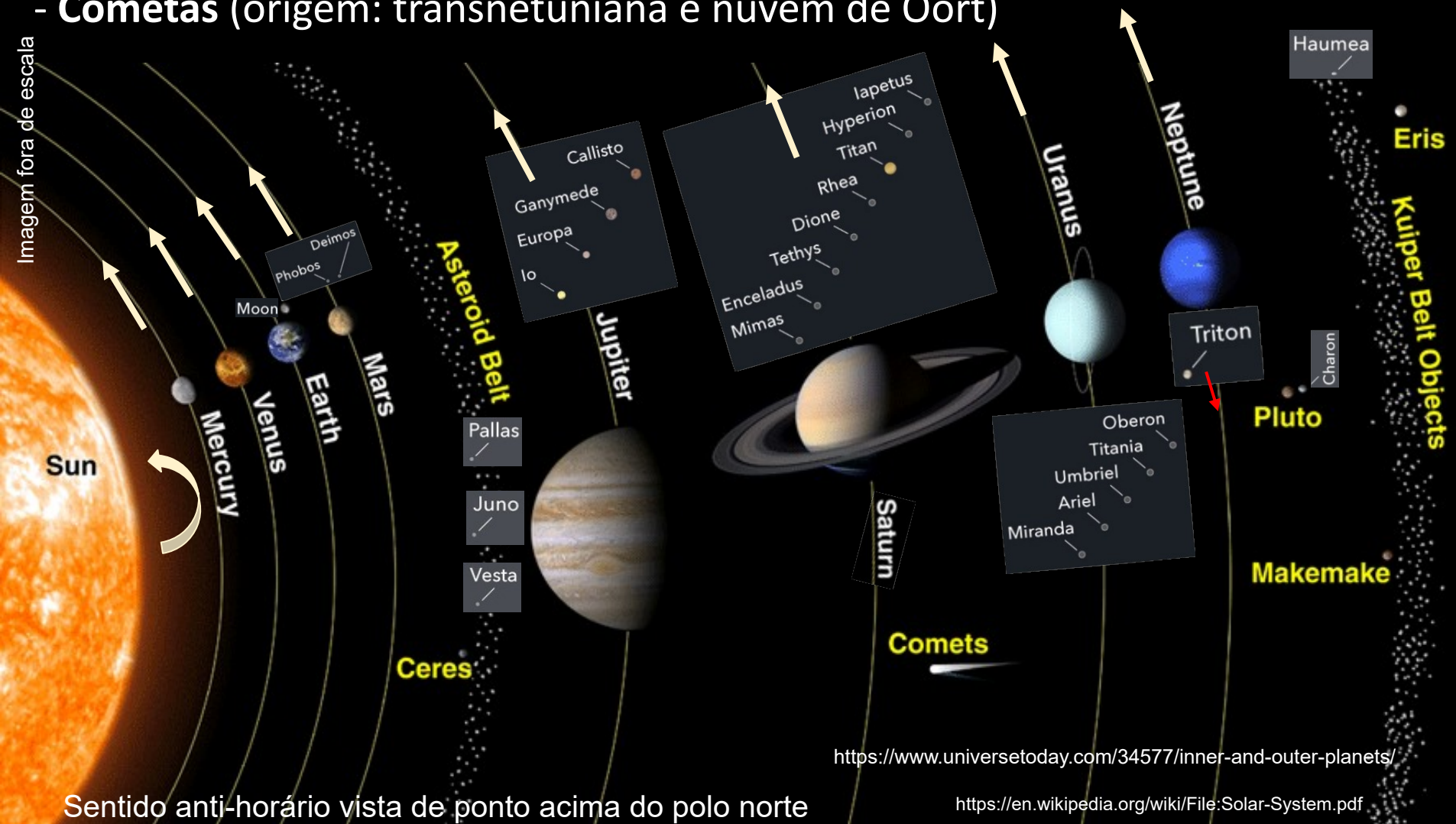
- 10 em 1849
  - 1 Ceres – 1801
  - 2 Pallas – 1802
  - 3 Juno – 1804
  - 4 Vesta – 1807
  - 5 Astraea – 1845
  - 6 Hebe – julho de 1847
  - 7 Iris – agosto de 1847
  - 8 Flora – outubro de 1847
  - 9 Metis – 25 de abril de 1848
  - 10 Hygiea – 12 de abril de 1849 *décimo asteroide descoberto*
- 100 asteroides em 1868
- 1.000 em 1921
- 10.000 em 1989
- 100.000 em 2005<sup>[24]</sup>
- 1.000.000 em 2020<sup>[7]</sup> 700 000 em 2015

Como são corpos pequenos, a aparência é como se fosse uma estrela, daí o nome asteroide, a partir do grego ἀστεροειδής, que quer dizer semelhante a estrela.

Já foram chamados também de “planeta menor (*minor planet*)”, mas atualmente a UAI prefere “corpo menor do sistema solar”

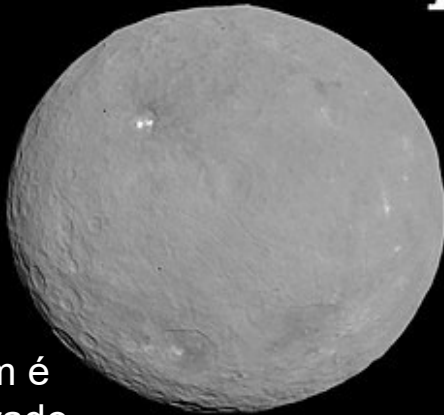
# Pequenos corpos do sistema solar:

- **Luas** (formadas *in situ* ou capturadas [p.ex. Tritão]) e **anéis** (limite de Roche)
- **Asteroides** (e.g. Ceres) na região interna (cinturão de asteroides 2,1 - 3,3 UA)
- **Objetos transnetunianos** (30 - 100 UA): cinturão de Kuiper + disco disperso
- **Cometas** (origem: transnetuniana e nuvem de Oort)



**Asteroides.** Os asteroides são pequenos corpos rochosos (diâmetros ~1m a 939 km), remanescentes (planetesimais e protoplanetas) da formação do Sistema Solar

## The four largest asteroids



(Também é considerado planeta anão)

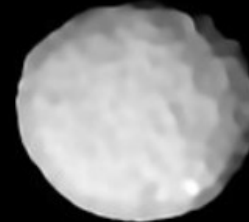
**Ceres**

939 km



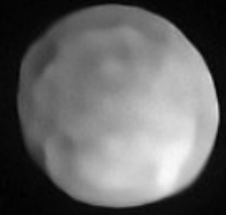
**Vesta**

525 km



**Pallas**

512 km



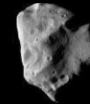
**Hygiea**

434 km

**Vesta**  
572,6 × 557,2 × 446,4 km  
Mean diameter: 525 km



4 Vesta



21 Lutetia



253 Mathilde



243 Ida

(243) Ida 1 Dactyl



433 Eros



951 Gaspra

2867 Šteins

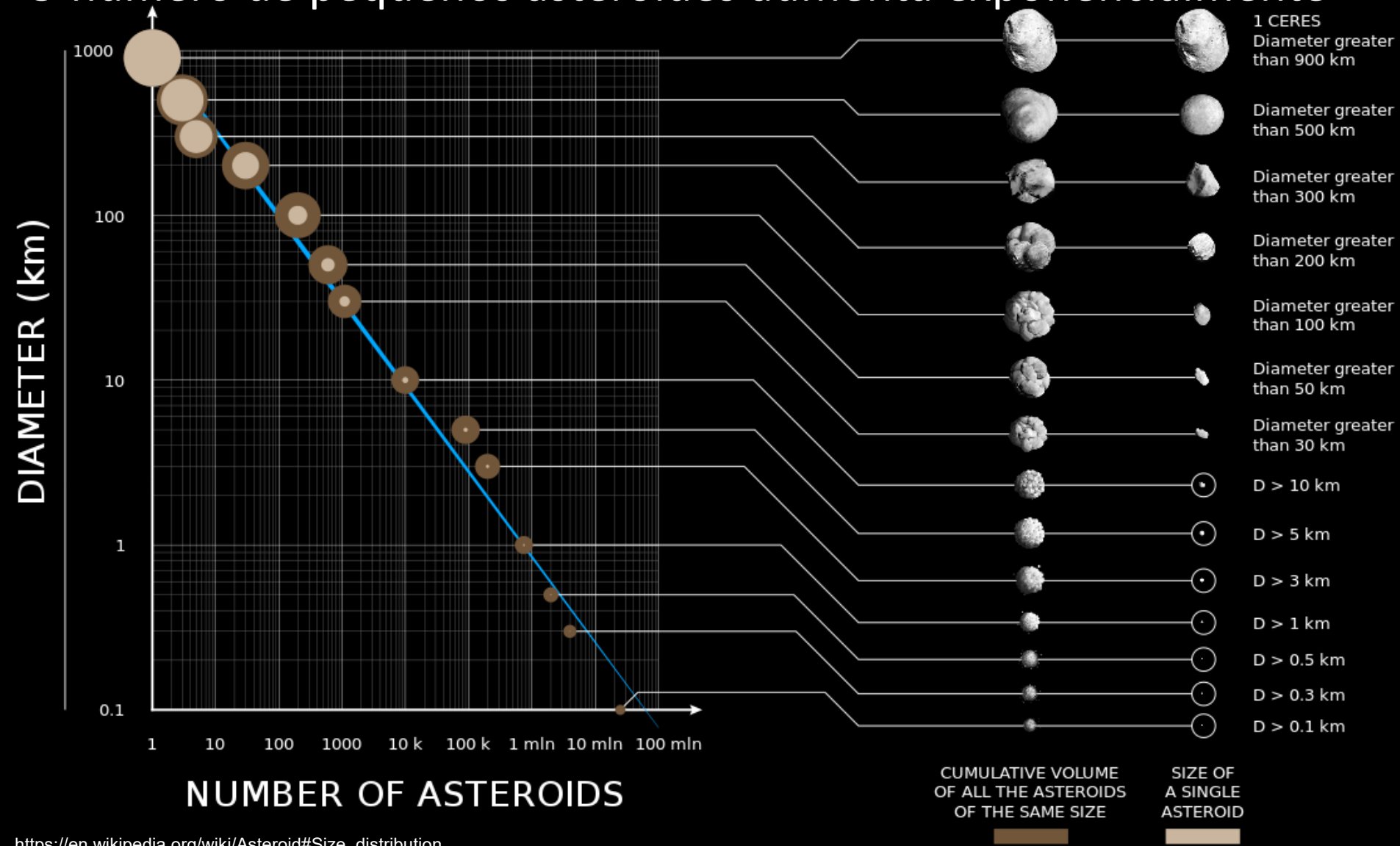


25143 Itokawa



**433 Eros**  
13 x 13 x 33 km

# O numero de pequenos asteroides aumenta exponencialmente



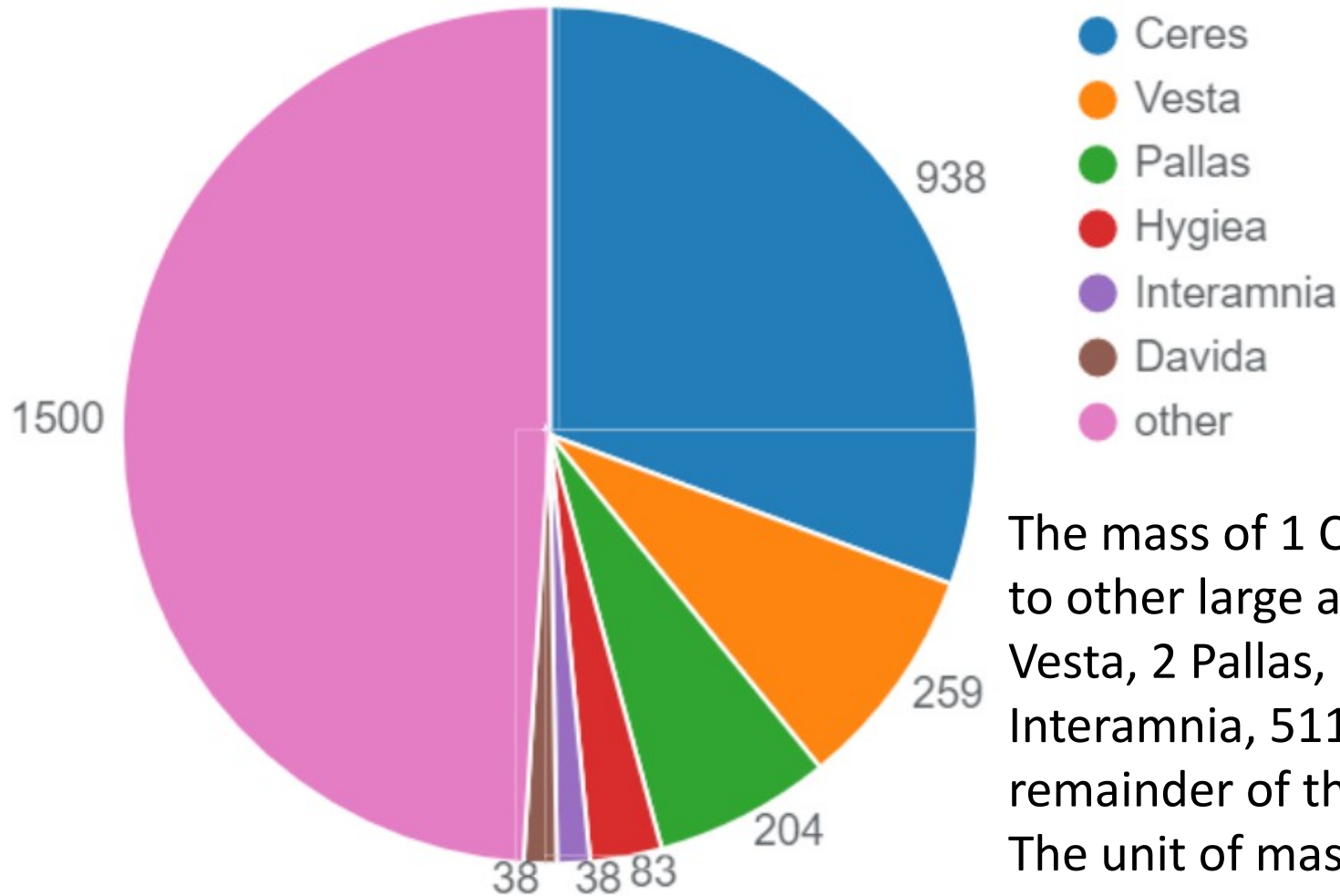
[https://en.wikipedia.org/wiki/Asteroid#Size\\_distribution](https://en.wikipedia.org/wiki/Asteroid#Size_distribution)

Approximate number of asteroids (N) larger than a certain diameter (D)

D	0.1 km	0.3 km	0.5 km	1 km	3 km	5 km	10 km	30 km	50 km	100 km	200 km	300 km	500 km	900 km
N	25 000 000	4 000 000	2 000 000	750 000	200 000	90 000	10 000	1100	600	200	30	5	3	1

# A massa do cinturão de asteroides está concentrada nos maiores corpos

## Mass of Ceres compared nos maiores corpos



The mass of 1 Ceres compared to other large asteroids: 4 Vesta, 2 Pallas, 10 Hygiea, 704 Interamnia, 511 Davida & the remainder of the Main Belt. The unit of mass is  $\times 10^{18}$  kg.

Os asteroides têm tamanhos de 939 km (Ceres) a 1 m.

Asteroides com raio  $> 200\text{-}300$  m  $\rightarrow$  aproximadamente esferoidal

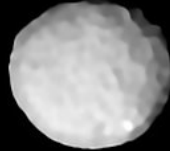
### The four largest asteroids



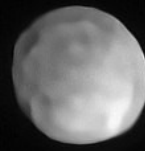
**Ceres**  
939 km



**Vesta**  
525 km



**Pallas**  
512 km



**Hygiea**  
434 km



**21 Lutetia**  
121 x 100 x 75 km



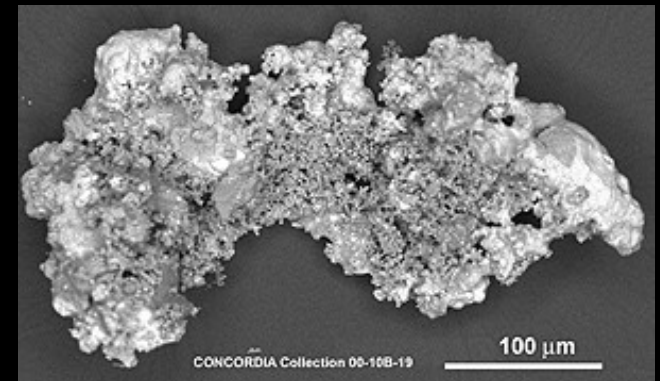
**433 Eros**  
13 x 13 x 33 km

O tamanho mínimo não está bem definido, mas é adoptado  $\sim 1\text{m}$

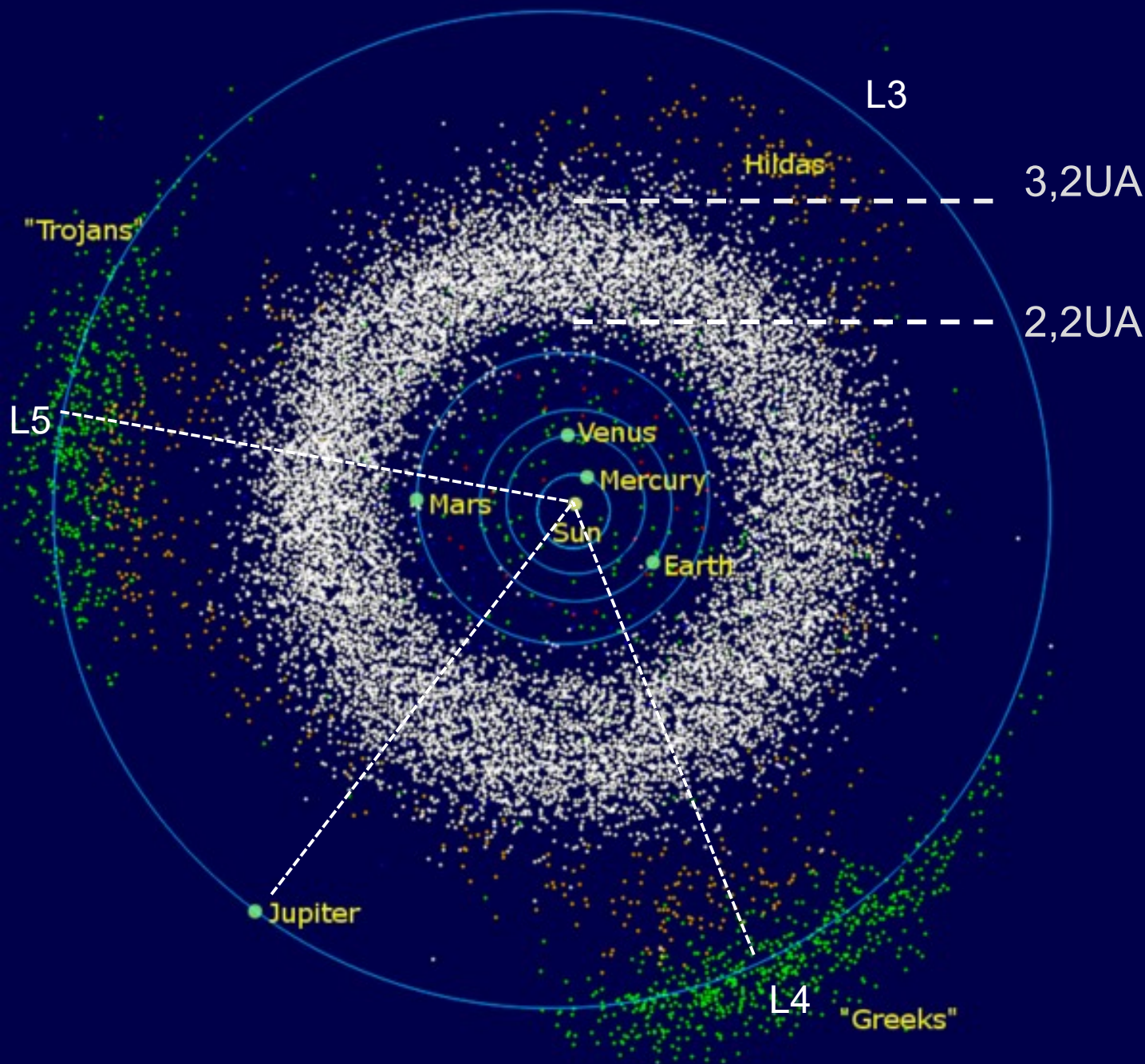
Asteroides: 1 m – 939 km

Meteoroides:  $30\ \mu\text{m}$  (0,03 mm) – 1 m

Poeira  $< 30\ \mu\text{m}$







## Asteroides.

Localizados principalmente no Cinturão de Asteroides entre Marte e Júpiter. São restos que não formaram um planeta.

Fora do Cinturão, temos em formato triangular os **Hildas (laranja)** e na órbita de Júpiter os **Troianos (verde)**.

# Near-Earth Objects (NEOs): Objetos próximos da Terra.

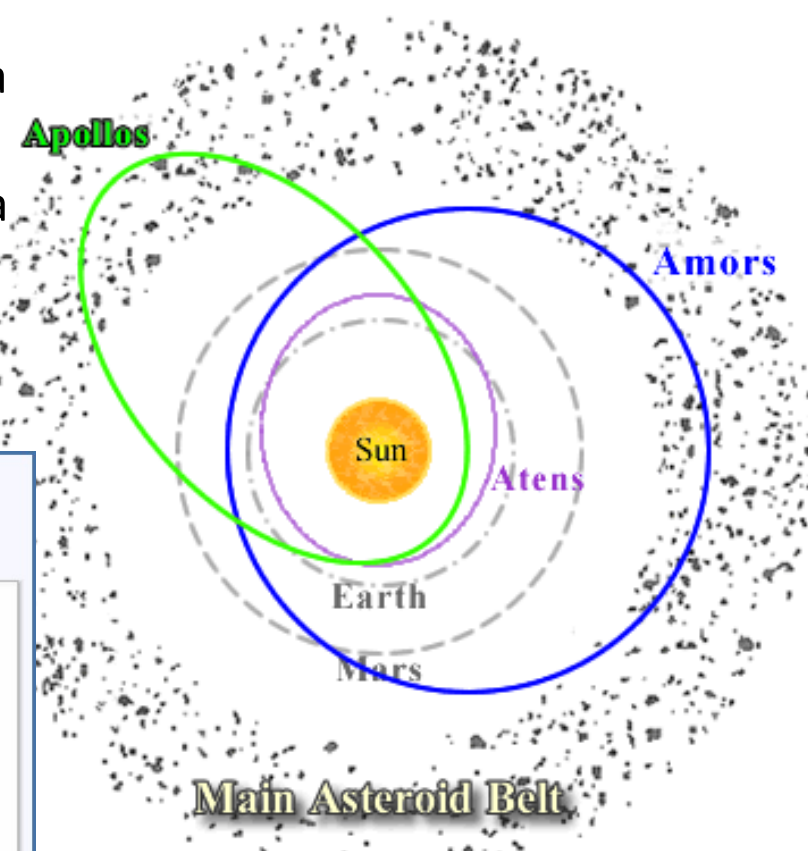
Órbita da Terra: periélio = 0,983 UA, afélio = 1,017 UA

**Atras/Apoheles:** órbita afélio  $Q <$  periélio Terra

**Atens:** semi-eixo maior  $a <$  1 UA e cruzam a órbita da Terra.  $a <$  1 UA e afélio  $Q >$  0.983 AU

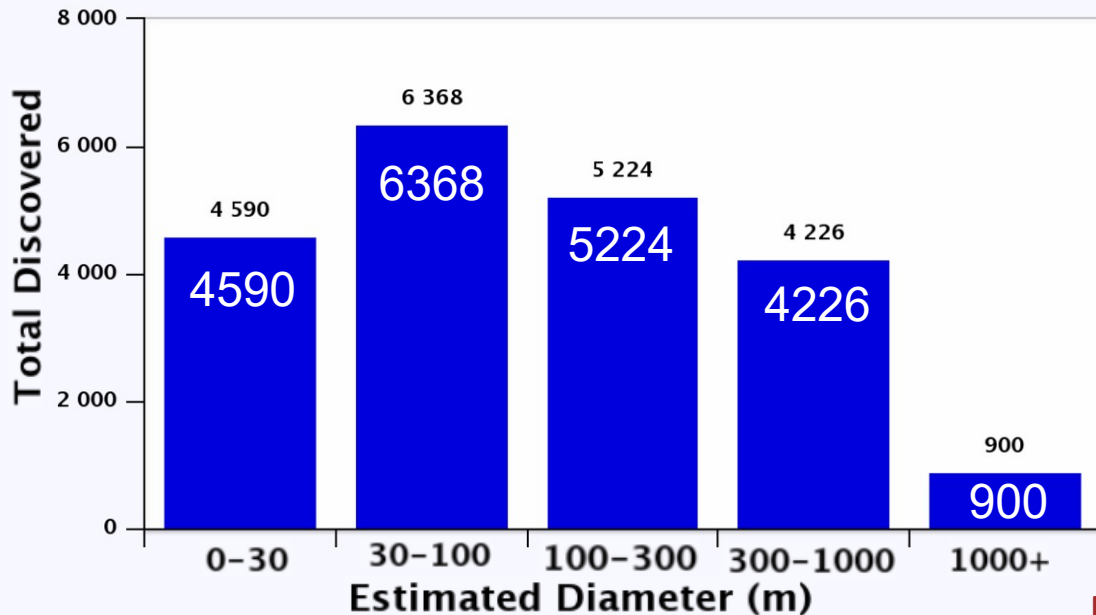
**Apollos:** semi-eixo maior  $>$  1 UA e cruzam a órbita da Terra.  $a >$  1 UA e periélio  $q <$  1.017 AU

**Amors:** órbita  $>$  terrestre: periélio  $q >$  afélio Terra e  $q <$  1.3 AU  $\rightarrow$   $1.017 < q <$  1.3 UA ( $a >$  1.017 UA)



### Near-Earth Asteroids Discovered

Total per Size Bin (as of 2019–Nov-02)

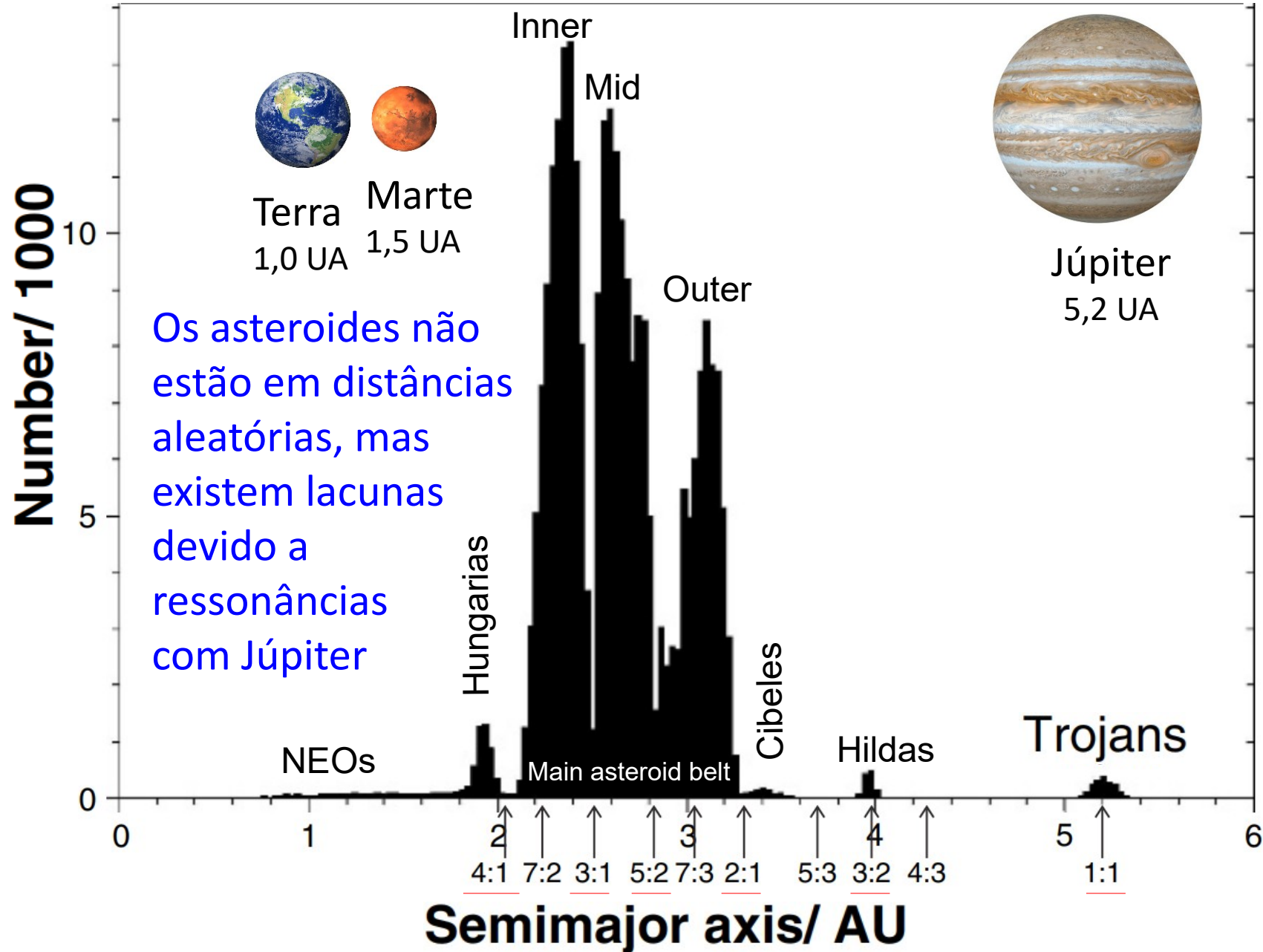


<https://cneos.jpl.nasa.gov/stats/>

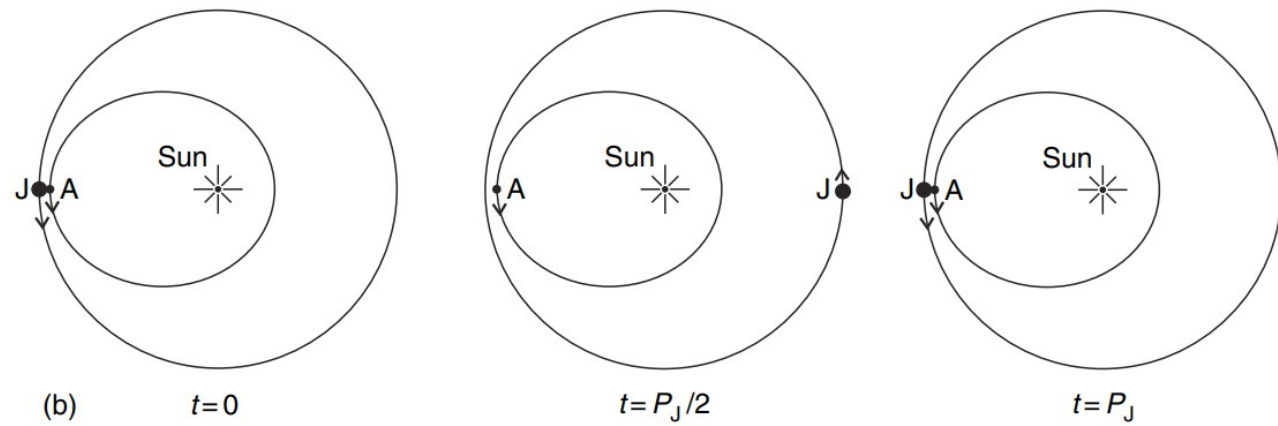
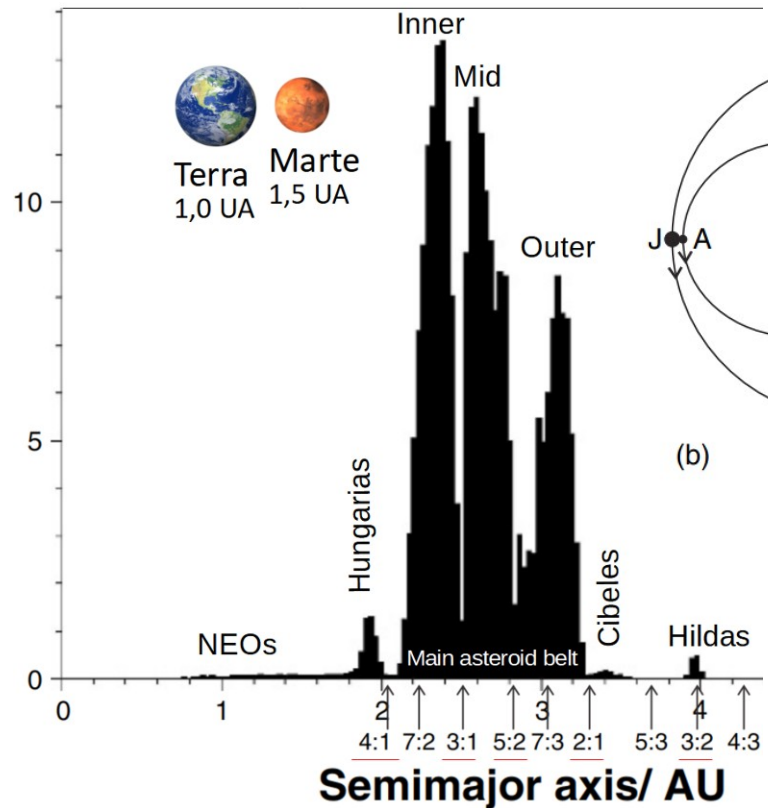
Alan Chamberlin (JPL/Caltech)

For  
a  
Dentr

Green	Apollos: 15,142 (55.4%)
Light Blue	Amors: 9,963 (36.4%)
Purple	Atens: 2,107 (7.7%)
Red	Comets: 117 (0.4%)
Black	Atras/Apohele: 26 (0.1%)

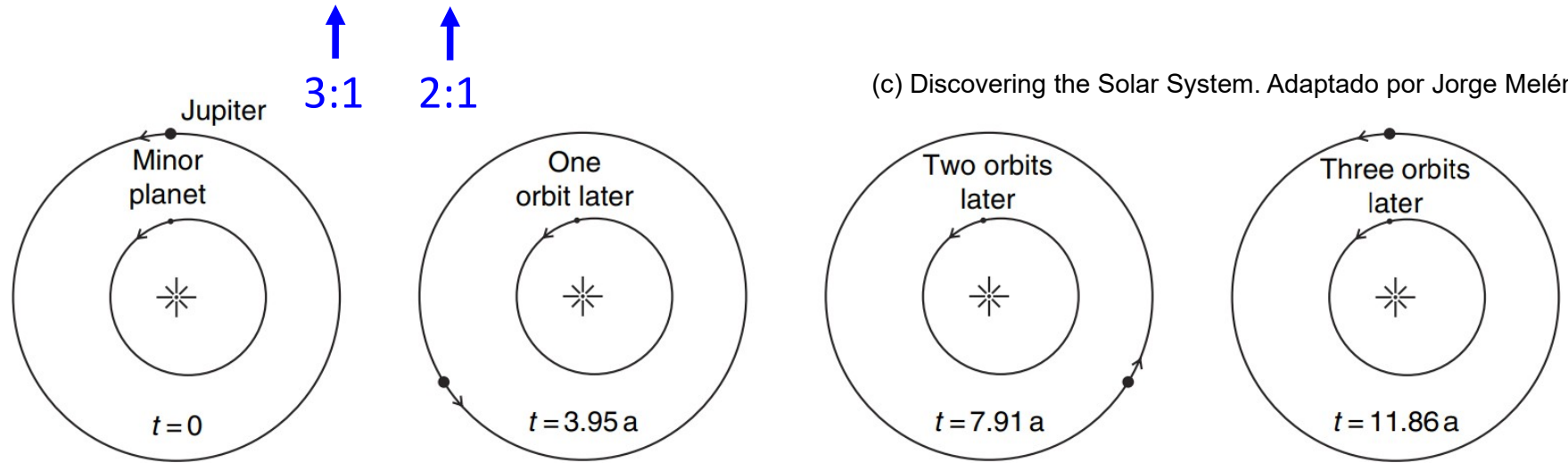


**Figure 3.1** The distribution of the semimajor axes of the orbits of the asteroids in October 2006. (Adapted from data available at the Minor Planet Center) (c) Discovering the Solar System. Adaptado por Jorge Meléndez



The 2:1 mmr

**Figure 1.14** (b) The aphelion of the asteroid occurs when it is in line between the Sun and Jupiter (probably unstable).

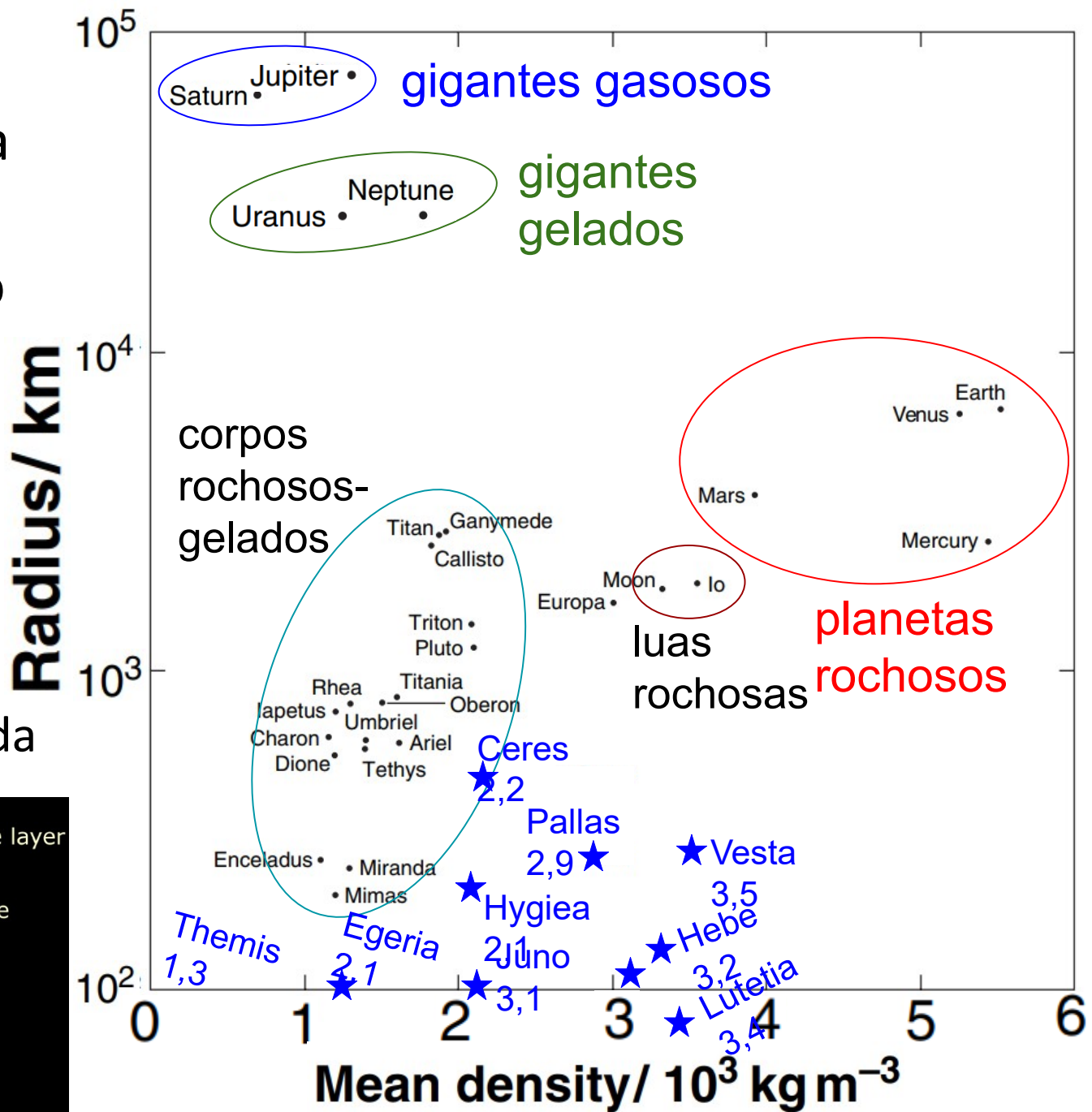
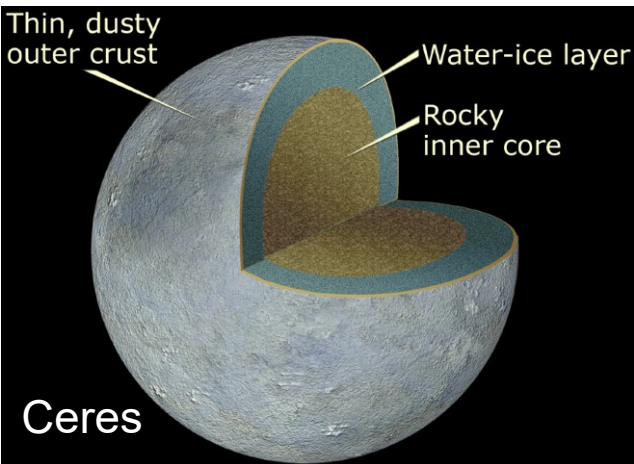


(c) Discovering the Solar System. Adaptado por Jorge Meléndez

**Figure 3.2** The 3:1 mmr of an asteroid with Jupiter. Figure 1.14 illustrates the 2:1 resonance.

Raio vs.  
densidade média  
de planetas e  
outros corpos do  
sistema solar.

Asteroide Ceres:  
interior rochoso,  
manto de gelo e  
crosta rochosa-gelada

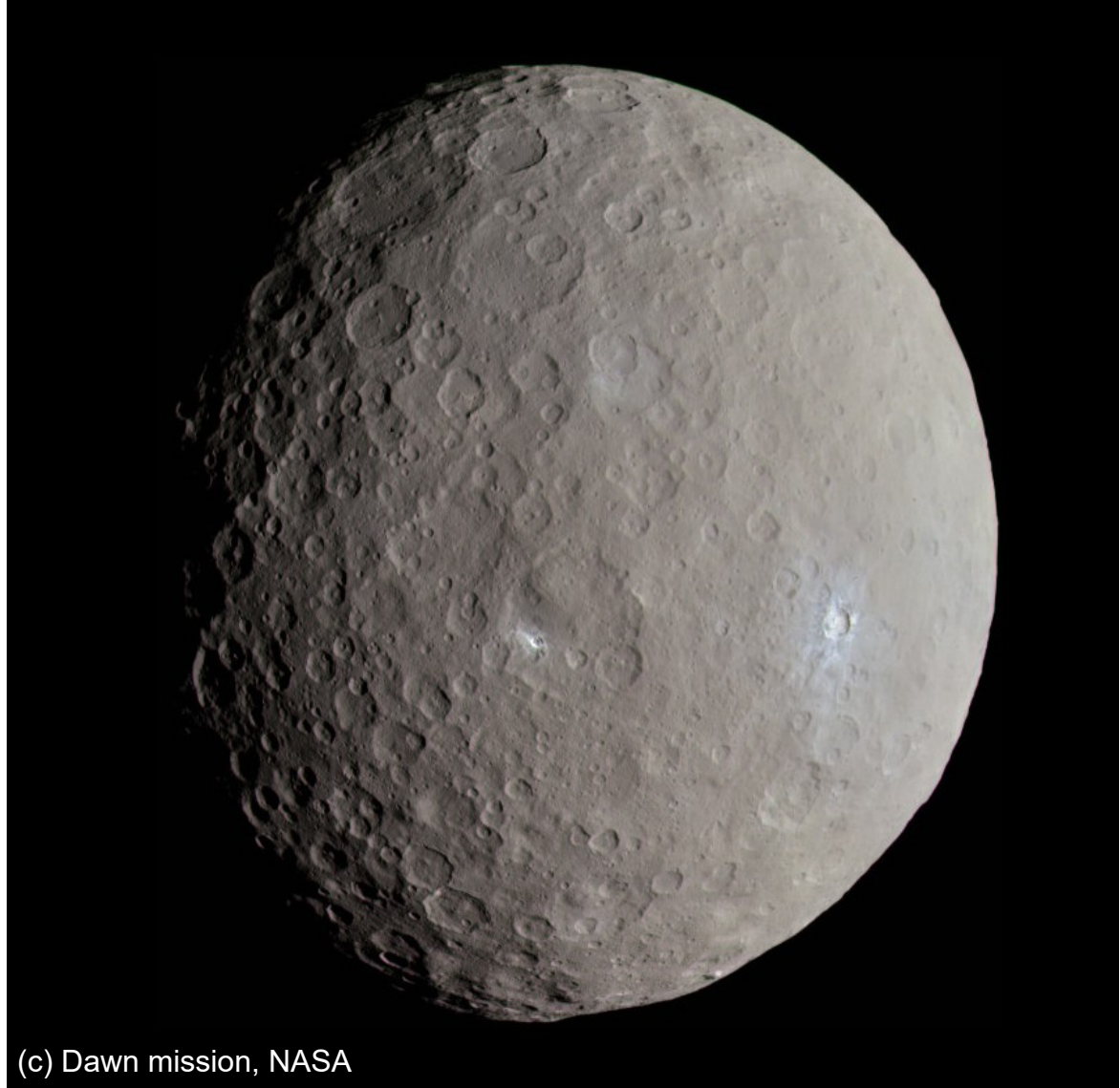
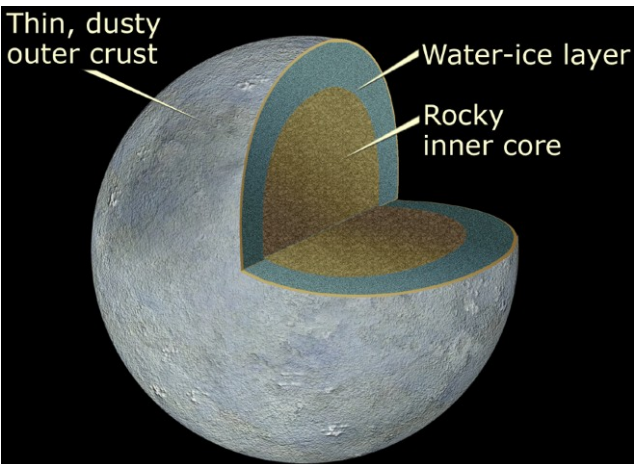


# Asteroide 1 Ceres

964 × 964 × 892 km

- Superfície craterada, como Mercúrio e a Lua.
- Asteroide tipo C, carbonáceo
- Similar a meteoritos condritos carbonáceos

Asteroide Ceres: interior rochoso, manto de gelo e crosta rochosa-gelada

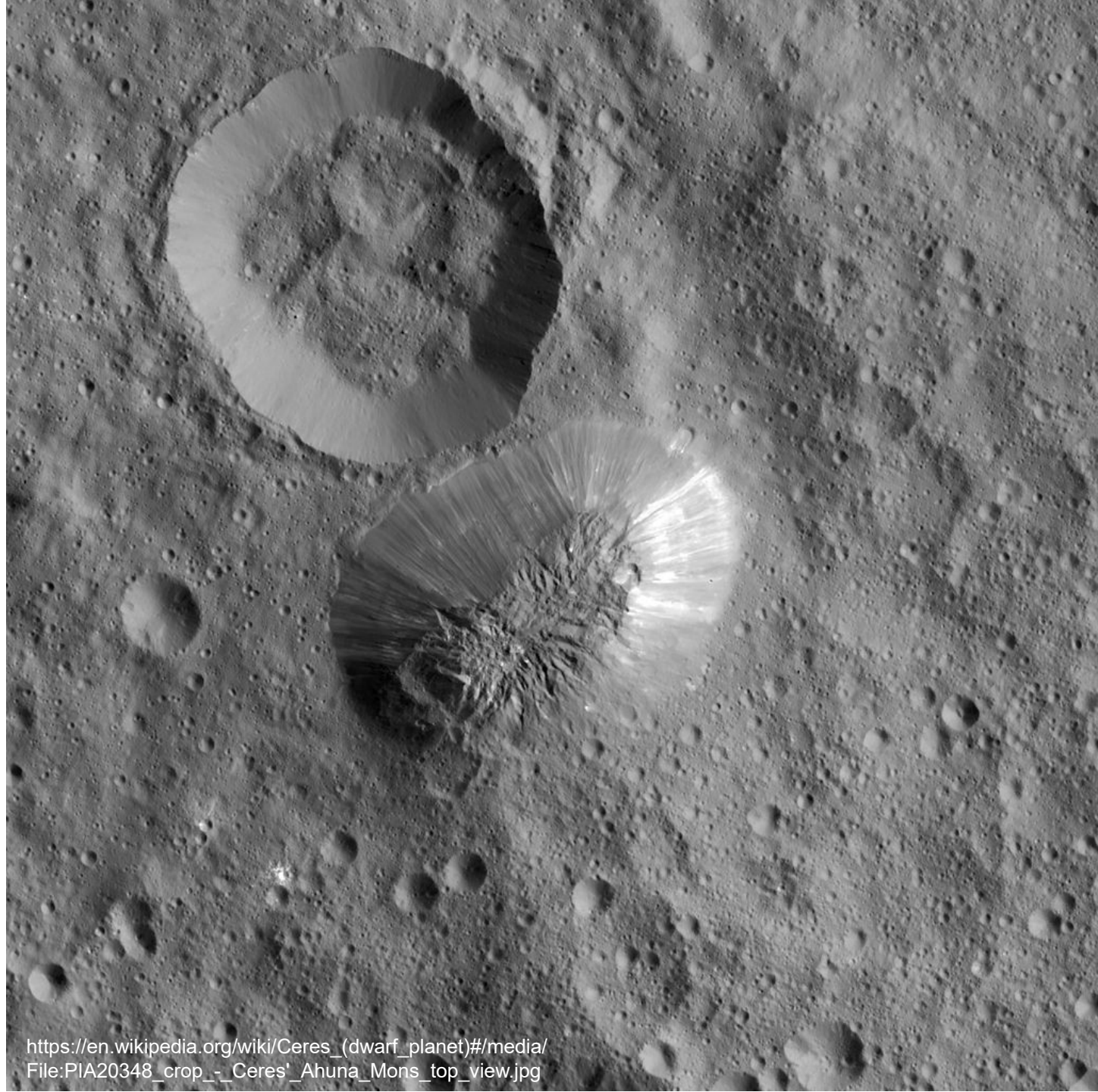


$$\rho = 2,2 \text{ g/cm}^3$$

Approximate true-color image of Ceres, using the F7 ('red'), F2 ('green') and F8 ('blue') filters, projected onto a clear filter image. Images were acquired by Dawn at 04:13 UT May 4, 2015, at a distance of 13641 km. At the time, Dawn was over Ceres' northern hemisphere. The prominent, bright crater at right is Haulani. The smaller bright spot to its left is exposed on the floor of Oxo. Ejecta from these impacts appears to have exposed high albedo material similar to deposits found on the floor of Occator Crater. Image Credit: NASA / JPL-Caltech / UCLA / MPS / DLR / IDA / Justin Cowart

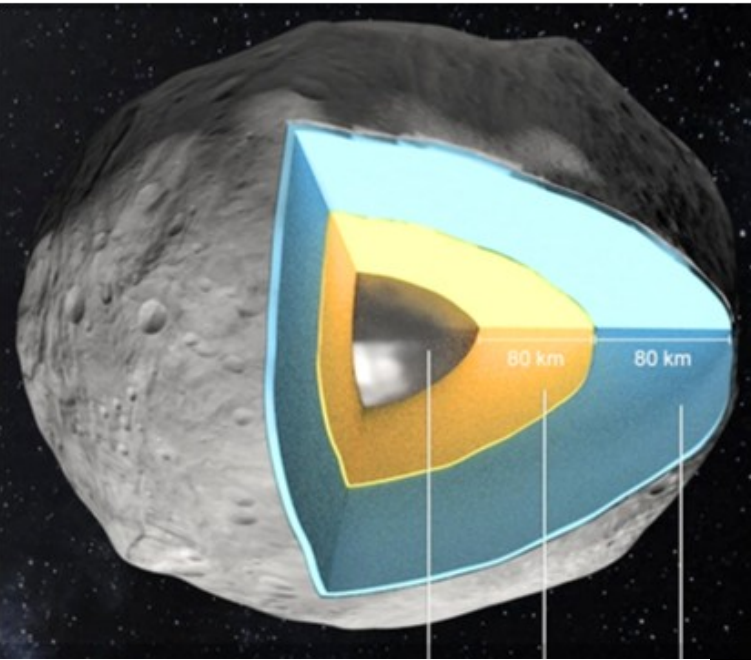
Ahuna Mons:  
criovulcão em  
Ceres?

Altura = 5 km



Asteroide 4 Vesta,  $573 \times 557 \times 446$  km,  $\rho = 3,5$  g/cm<sup>3</sup>

Semi-eixo maior = 2,36 UA



Asteroide  
diferenciado

Núcleo Fe-Ni

Manto rochoso

Crosta



(c) Dawn mission, 24/7/2011

[https://www.nasa.gov/mission\\_pages/dawn/multimedia/pia15678.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/dawn/multimedia/pia15678.html)



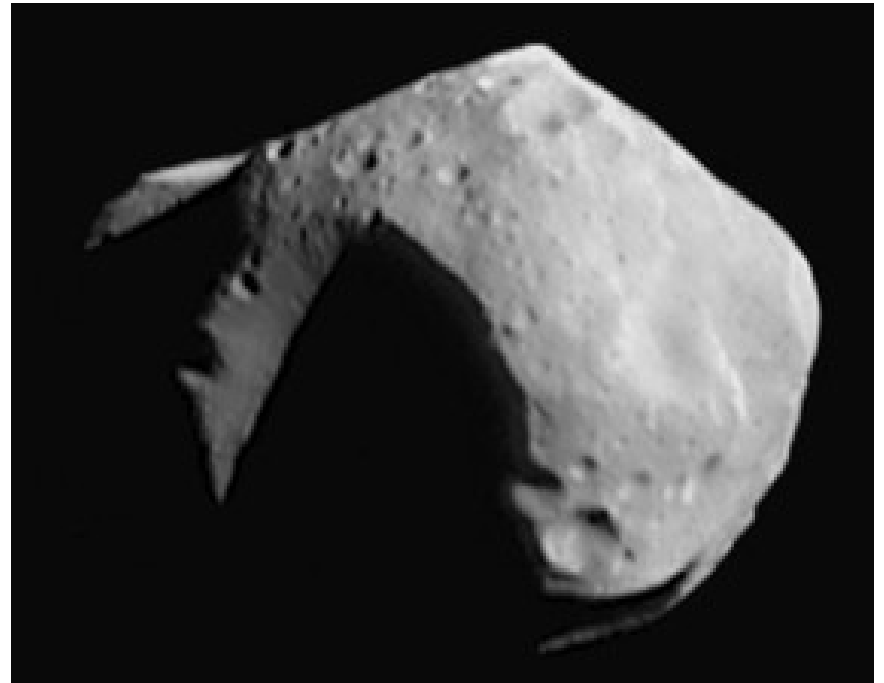
Asteroide 951 Gaspra não apresenta grandes crateras (como por ex. Mathilde) → talvez é o resto de uma colisão que aconteceu “recentemente” (há 20 – 300 milhões de anos)

951 Gaspra, classe S  
18.2 × 10.5 × 8.9 km



(c) Galileo spacecraft

253 Mathilde, classe C  
66 × 48 × 46 km



(c) NEAR spacecraft

# 433 Eros

34.4 × 11.2 × 11.2 km

Classe S

Análise da densidade superficial de crateras indica que áreas com menor densidade estão dentro de 9 km do ponto de impacto de uma cratera maior. Algumas áreas de densidade mais baixa foram encontradas no lado oposto do impacto, mas ainda dentro de 9 km.

Teoria: ondas de choque sísmicas se propagam através do asteroide, transformando crateras menores em escombros



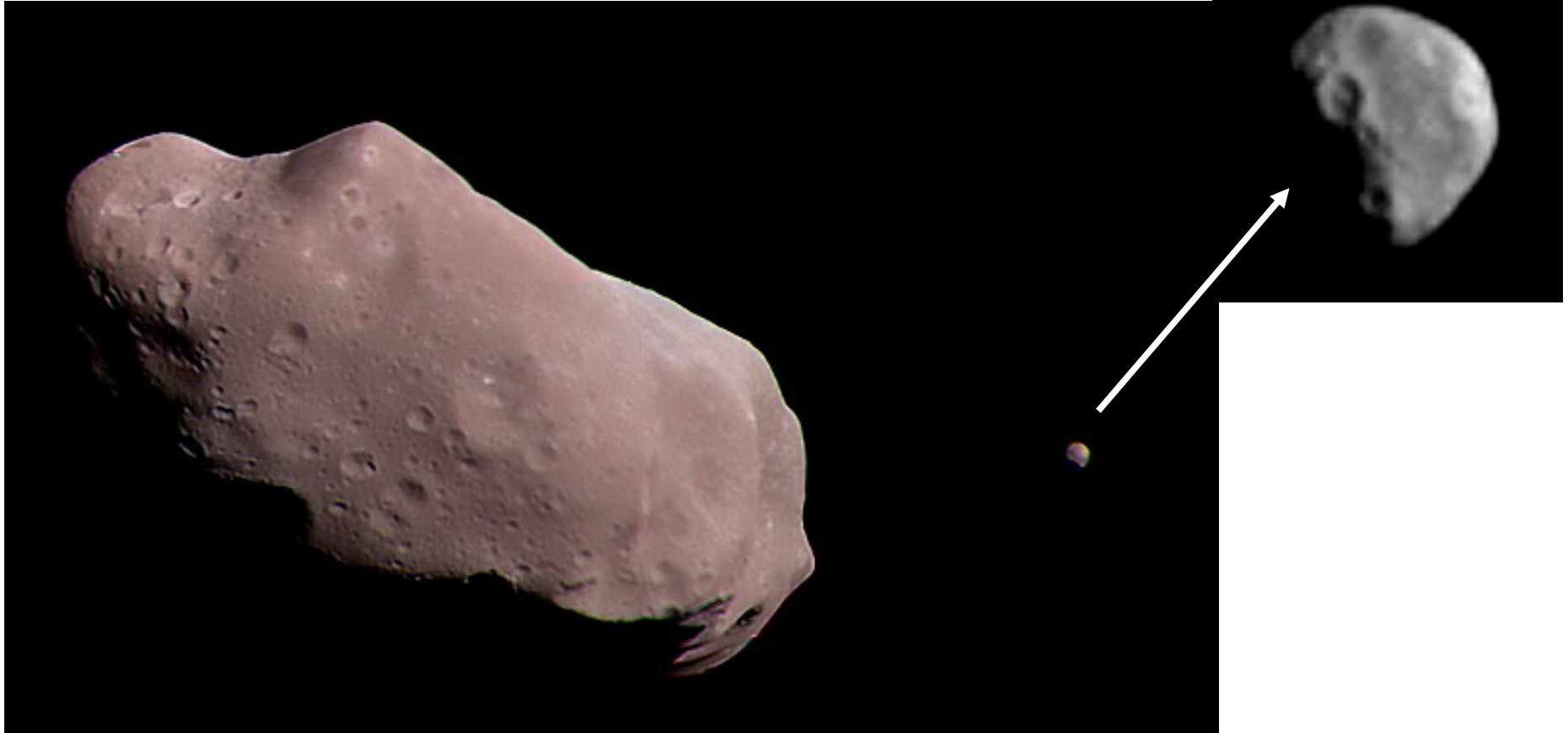
# Asteroide 243 Ida tem uma pequena lua!

243 Ida, classe S

59.8 × 25.4 × 18.6 km

Dactyl

1.6×1.4×1.2 km



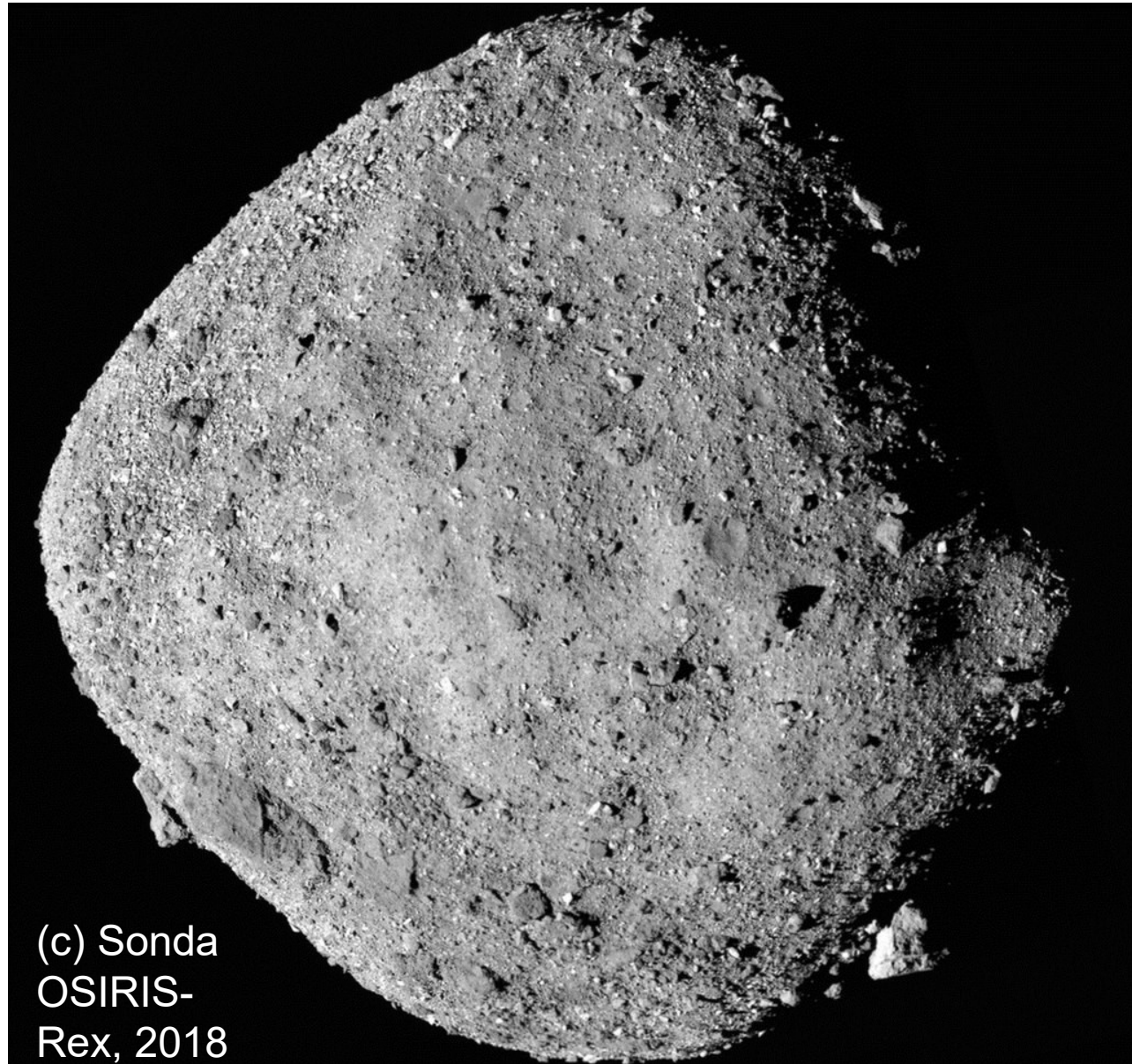
Asteroid 243 Ida as seen by the Galileo probe on August 28, 1993.

(c) NASA/JPL/Processed by Kevin M. Gill

101955 Bennu, classe B ( $\sim$ C), NEO (Apollo)  
565 × 535 × 508 m

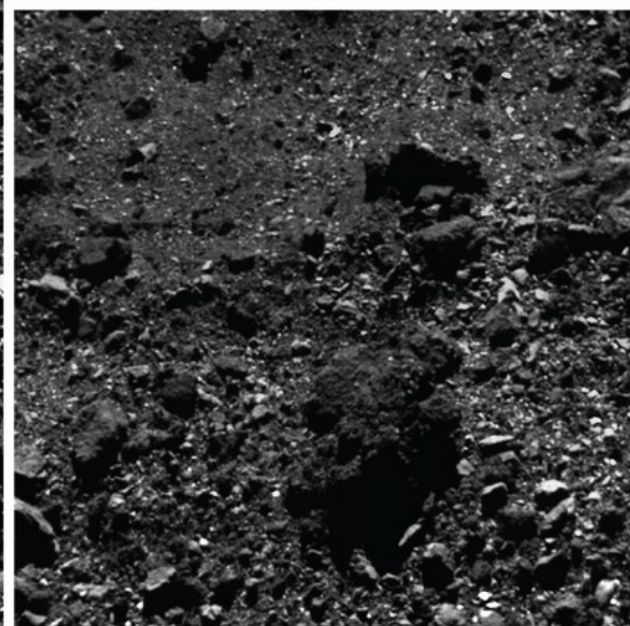
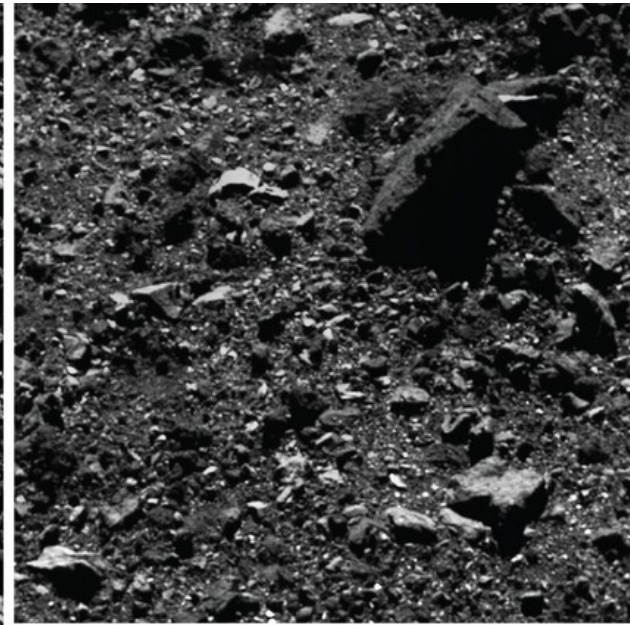
Pequena chance  
(1/2000) de  
impacto com a  
Terra ao redor do  
ano 2182

A baixa densidade  
(1,2 g/cm<sup>3</sup>) sugere  
que não é uma  
rocha compacta,  
mas é um  
aglomerado de  
pequenas rochas  
reunidas pela  
gravidade



(c) Sonda  
OSIRIS-  
Rex, 2018

A superfície de Bennu é coberta por regolitos. Considerando também a baixa densidade, Bennu parece uma pilha de entulho.





Coleta de amostra do asteroide Bennu pela OSIRIS-Rex em 10/2020.

Retornou a amostra para a Terra em 24/9/2023



Capsula da OSIRIS-REx retornou à Terra em 24/9/2023. A sonda **OSIRIS-Rex** segue para o asteroide **Apophis**, que chegará perto da **Terra** em **2029**

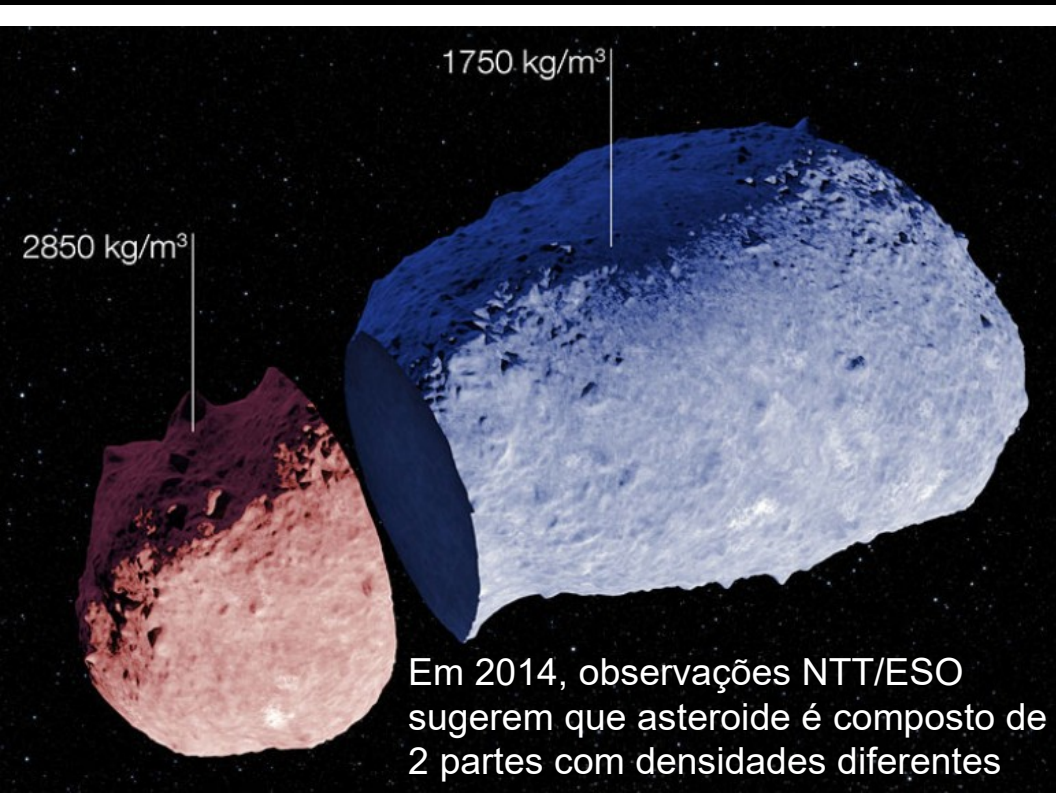


The sample return capsule from NASA's OSIRIS-REx mission is seen shortly after touching down in the desert at the Department of Defense's Utah Test and Training Range. Keegan Barber/NASA

25143 Itokawa, classe S  
535 × 294 × 209m  
NEO (Apollo)



(c) Sonda japonesa Hayabusa, 2005. Itokawa é o menor asteroide visitado por uma sonda espacial



As imagens da Hayabusa mostram uma ausência de crateras de impacto. A superfície é muito áspera e cravejada de pedras, como se fosse entulho. Ou seja, é um asteroide binário formado por fragmentos



# Classificação espectral de asteroides:

2 tipos principais:

S: silicatos

C: carbonáceos

3º grupo é o

M: metálicos

**Classe S:** silicatos com metais de Fe-Ni

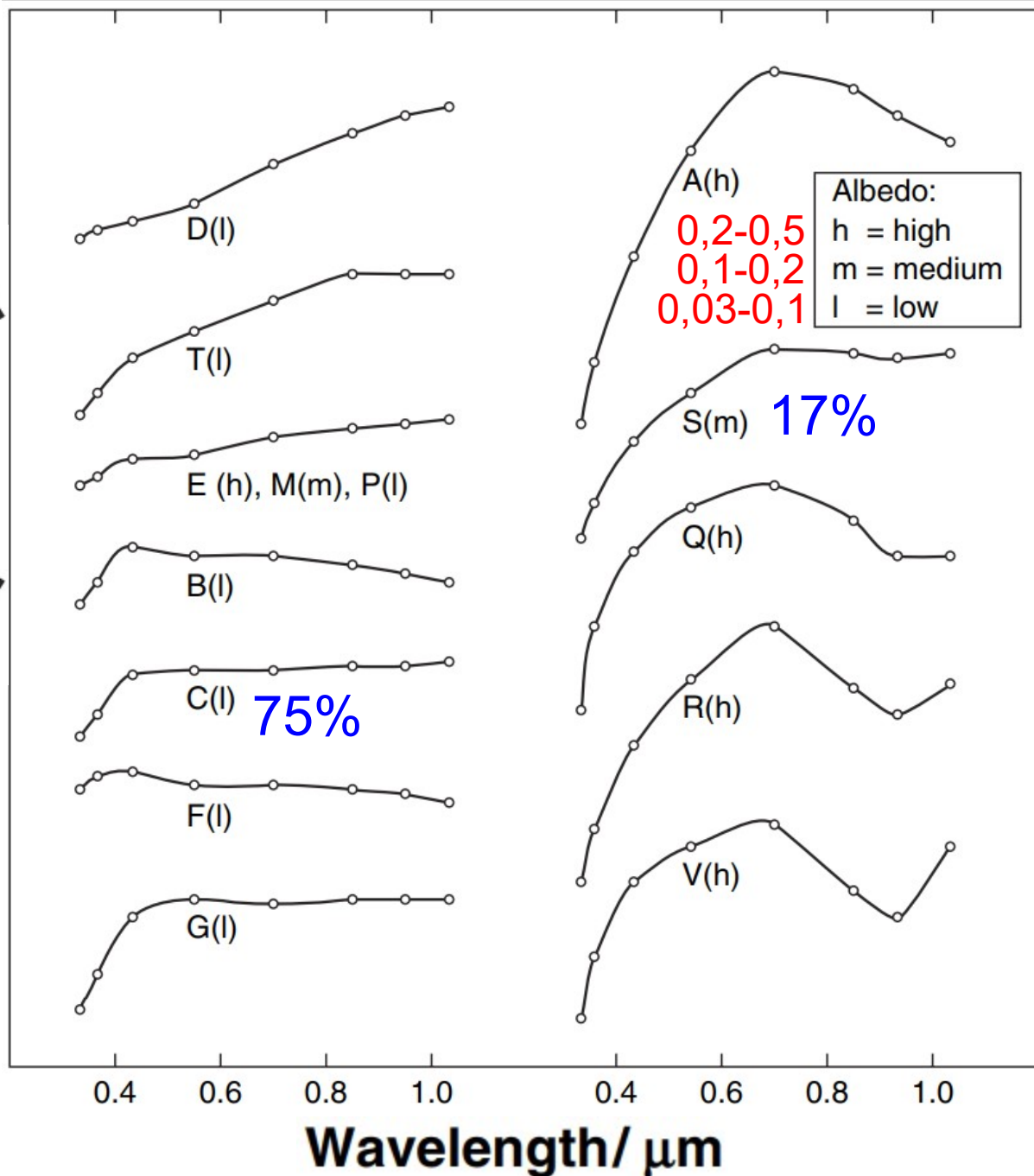
**Classe C:** meteorito condrito carbonáceo (silicatos misturados com minerais hidratados, metais Fe-Ni, carbono e compostos orgânicos)

**Classe M:** metálico (ferro e um pouco de Ni), com pouco ou nenhum silicato.

log

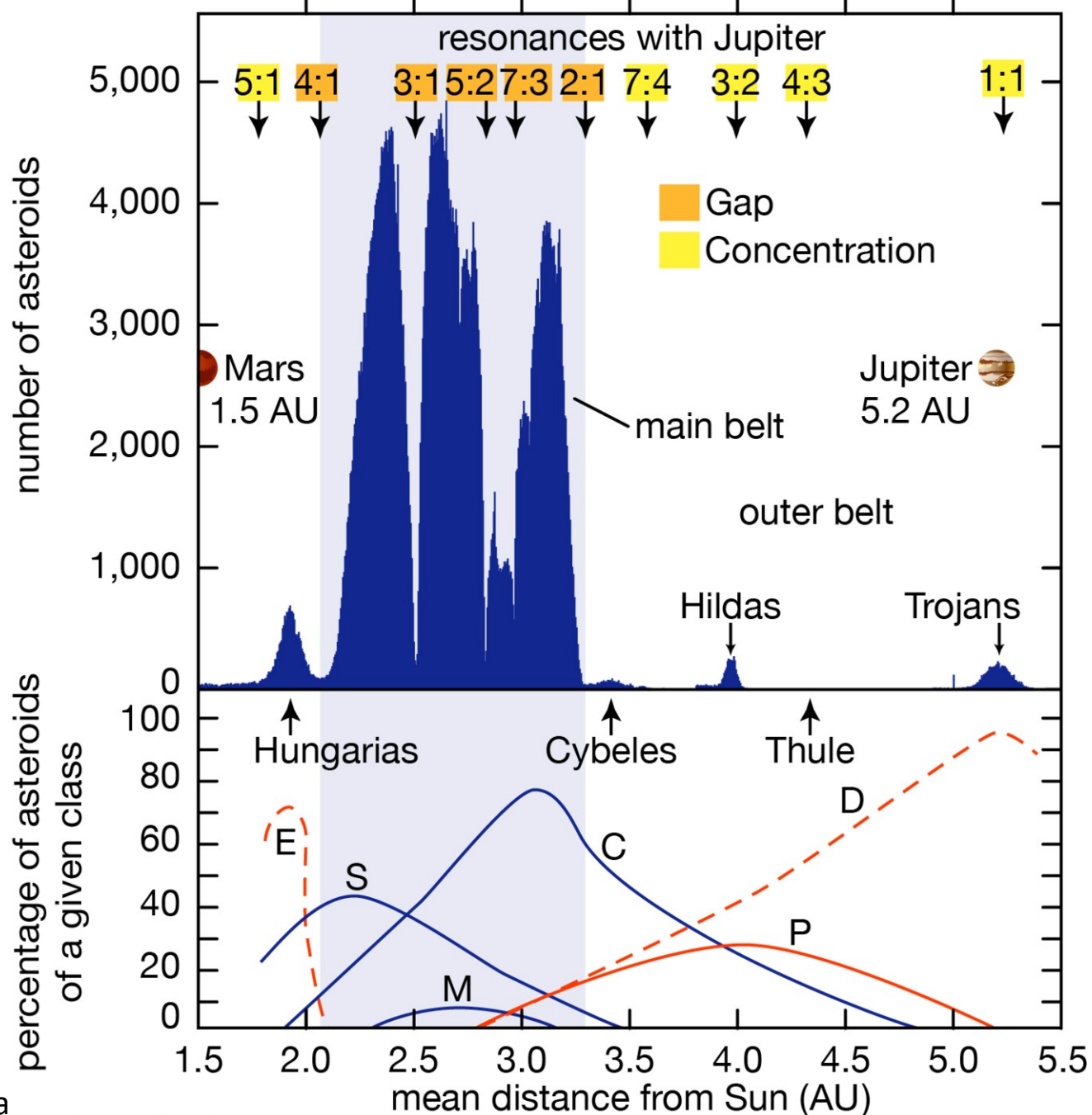
**Spectral reflectance**

**2X**



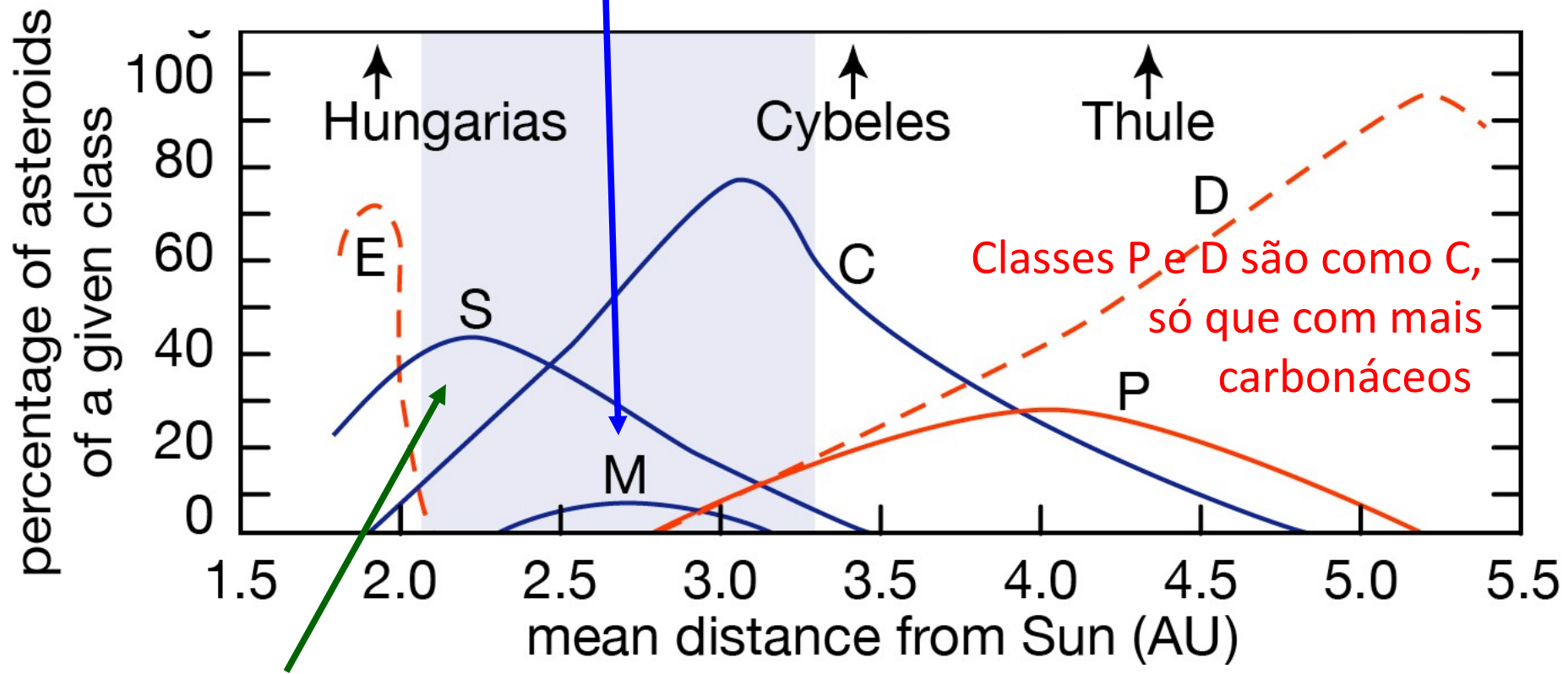
# Distribuição por tipo espectral.

- Tipo S (silicatos + metais) ocorre na região mais interna do cinturão de asteroides.
- Tipo C (silicatos + metais + minerais hidratados + carbonáceos) é mais frequente na região externa do cinturão.



Na figura o total de classes a uma determinada distância do Sol soma 100%

Como discutido nas aulas, um núcleo metálico surge por diferenciação.  
 Ou seja, não são formados asteroides completamente metálicos  
 → asteroide de classe M deve ser um pedaço de asteroide diferenciado

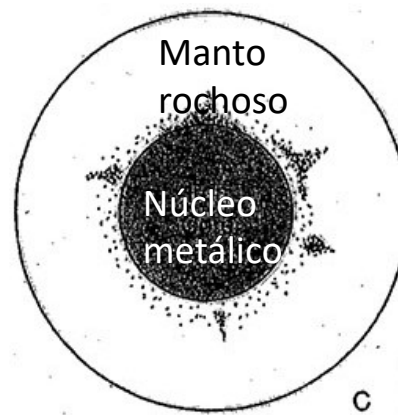


Uma fração importante dos asteroides de tipo S, que tem silicatos e metais, podem vir também de asteroides diferenciados, da interface entre o manto e o núcleo

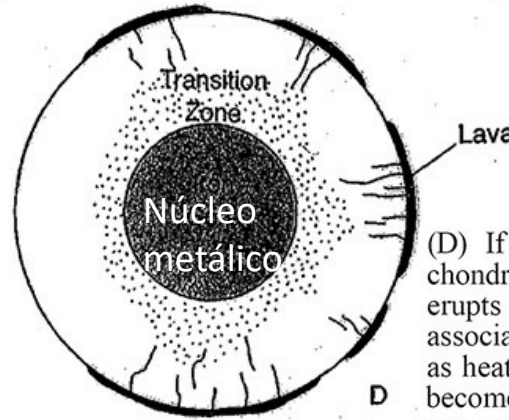
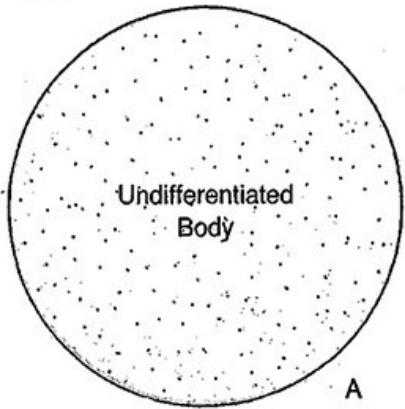
# Corpo não diferenciado

# Corpo diferenciado (diâmetro > 200 km)

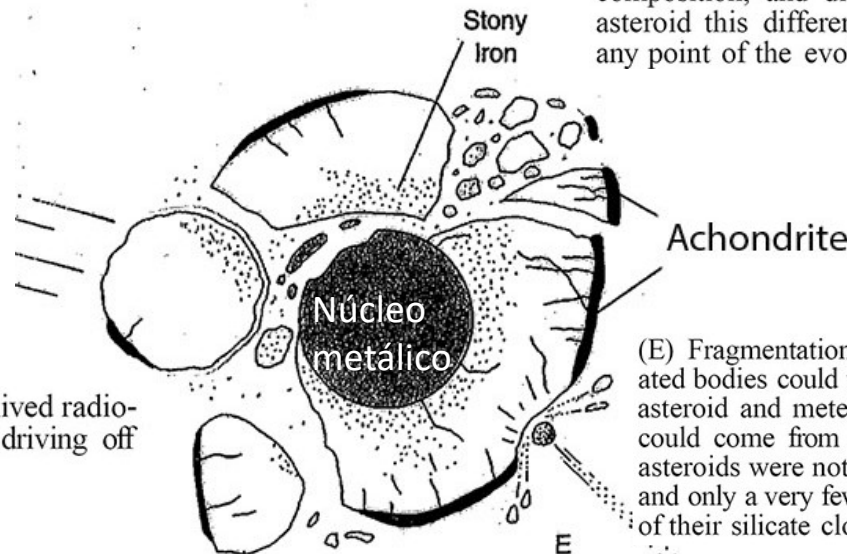
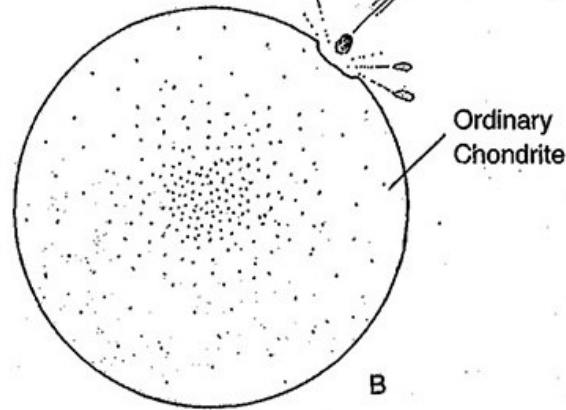
(A) An original body of primitive composition (carbonaceous, outer belt; ordinary, inner belt) forms by accretion.



(C) Or perhaps it is heated to the melting point of metallic iron. Dense segregations of iron drains toward the center of the body to form a core or several smaller accumulations of metal.



(D) If heating is intense enough, the silicates in the chondritic interior may melt to produce magma, which erupts at the surface to produce a thin veneer of lava and associated intrusive rocks. Eventually, the asteroid cools as heat is radiated away into space; the core and mantle become solid. Depending on (among other factors) size, composition, and distance from the Sun, for a specific asteroid this differentiation process may have ended at any point of the evolutionary scheme.



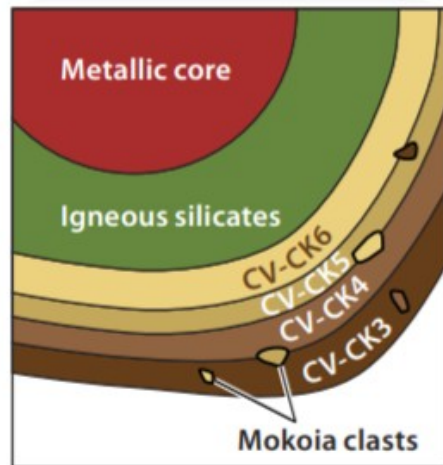
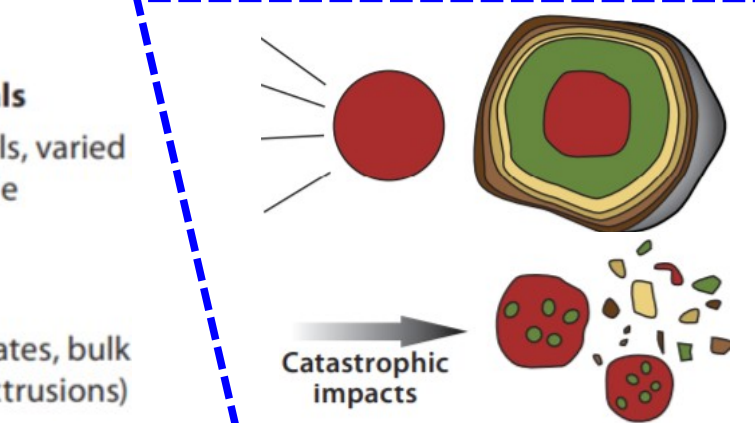
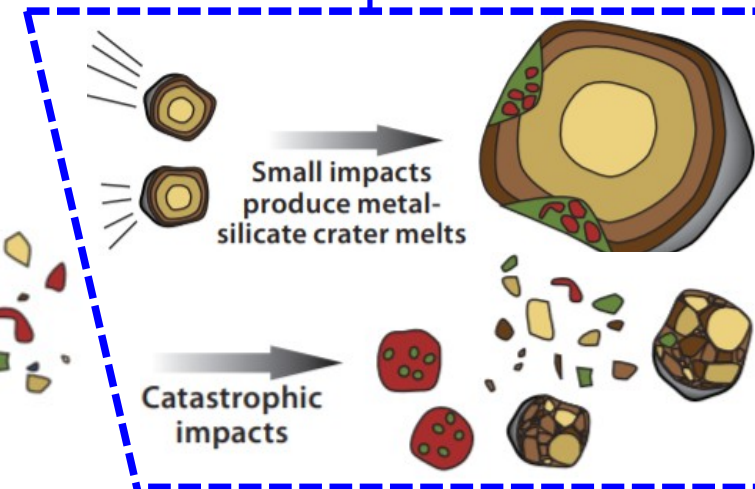
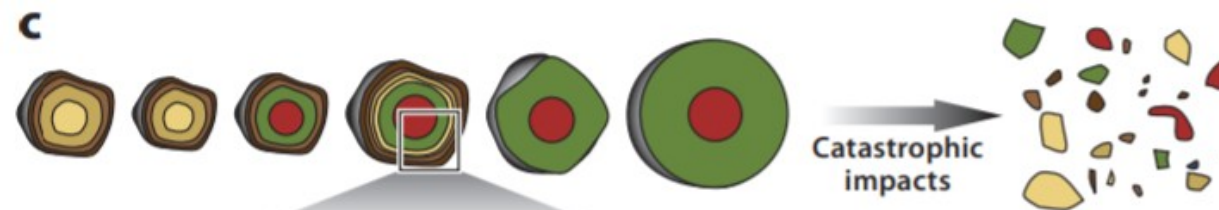
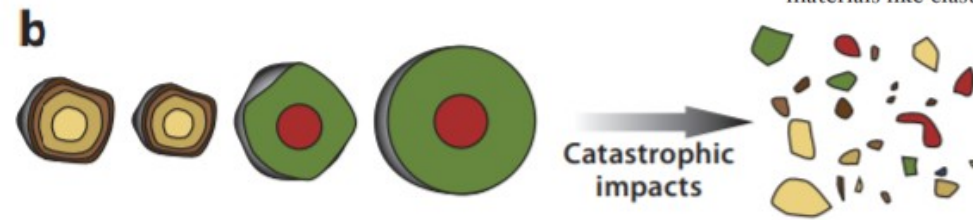
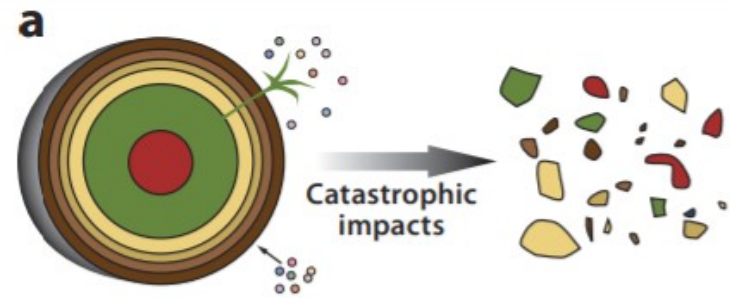
(E) Fragmentation of such differentiated or undifferentiated bodies could then produce the spectrum of observed asteroid and meteorite types. In fact, a variety of types could come from one body, as illustrated in (E). Most asteroids were not heated beyond the first or second step, and only a very few have exposed metallic cores stripped of their silicate cloaks.

(B) This small planetesimal is heated by short-lived radioactivity to the point of mild metamorphism, driving off some volatiles.

# Asteroides (e alguns meteoritos) têm origem em corpos diferenciados e não diferenciados

Meteorite parent body models. (a) All meteorites originated from one or a few Moon-sized partially differentiated bodies with chondritic surfaces formed by tuffaceous volcanism (Ringwood 1961), impact-induced melting, and/or deposition of exogenous material (Wood 1963). (b) Meteorites originated from multiple asteroid-sized bodies. Individual bodies were fully differentiated or fully undifferentiated (Mason 1967). (c) Meteorites originated from multiple, asteroid-sized bodies (Anders & Goles 1961). Individual bodies were fully differentiated, fully undifferentiated, or partially differentiated with an unmelted chondritic crust. (Inset) Schematic asteroid showing a possible structure of a partially differentiated CV-CK carbonaceous chondrite parent planetesimal (see Section 3.3). Metamorphosed and/or partially melted materials like clasts found in the CV chondrite Mokoia may be samples excavated from the deep interior.

## Outras possibilidades



### Undifferentiated materials

Chondritic materials, varied metamorphic grade

### Differentiated materials

Iron-nickel metal

Igneous silicates (cumulates, bulk magmas, and basaltic extrusions)

Differentiated Planetesimals and the Parent Bodies of Chondrites  
Benjamin P. Weiss<sup>1</sup> and Linda T. Elkins-Tanton, 2013, ARE&PS

Impactos de asteroides também têm acontecido com a Terra, mas a sua origem só foi estabelecida no século XX



### **Cratera do Meteoro (Barringer)**

- **1903**: Daniel Barringer acreditava que sua cratera foi produzida por grande (100 milhões de tons) meteorito de ferro → procurou (\$) mas não achou  
- **1920s**: Walter Bucher : crateras têm origem explosivo vulcânico

- **1929**: Cálculos de F.R.Moulton: asteroide < 300 000 tons e calor suficiente para vaporizar o asteroide instantaneamente

- **1960**: Edward Shao & Gene Shoemaker encontraram na Cratera Meteoro material produzido a alta pressão e temperat. → impacto

Eles confirmaram: boa parte do asteroide é derretida e vaporizada

→ Isso explicaria o fracasso de Barringer na busca do meteorito

Colisão de asteroide deixa cratera ~20 vezes maior.



**Cratera de Barringer** (a.k.a. **Cratera do Meteoro**), em Arizona, EUA. Diâmetro = 1,2km, profund. = 170 m. Idade = 50 mil anos. Produzida por asteroide de ~50 m a 13 km/s

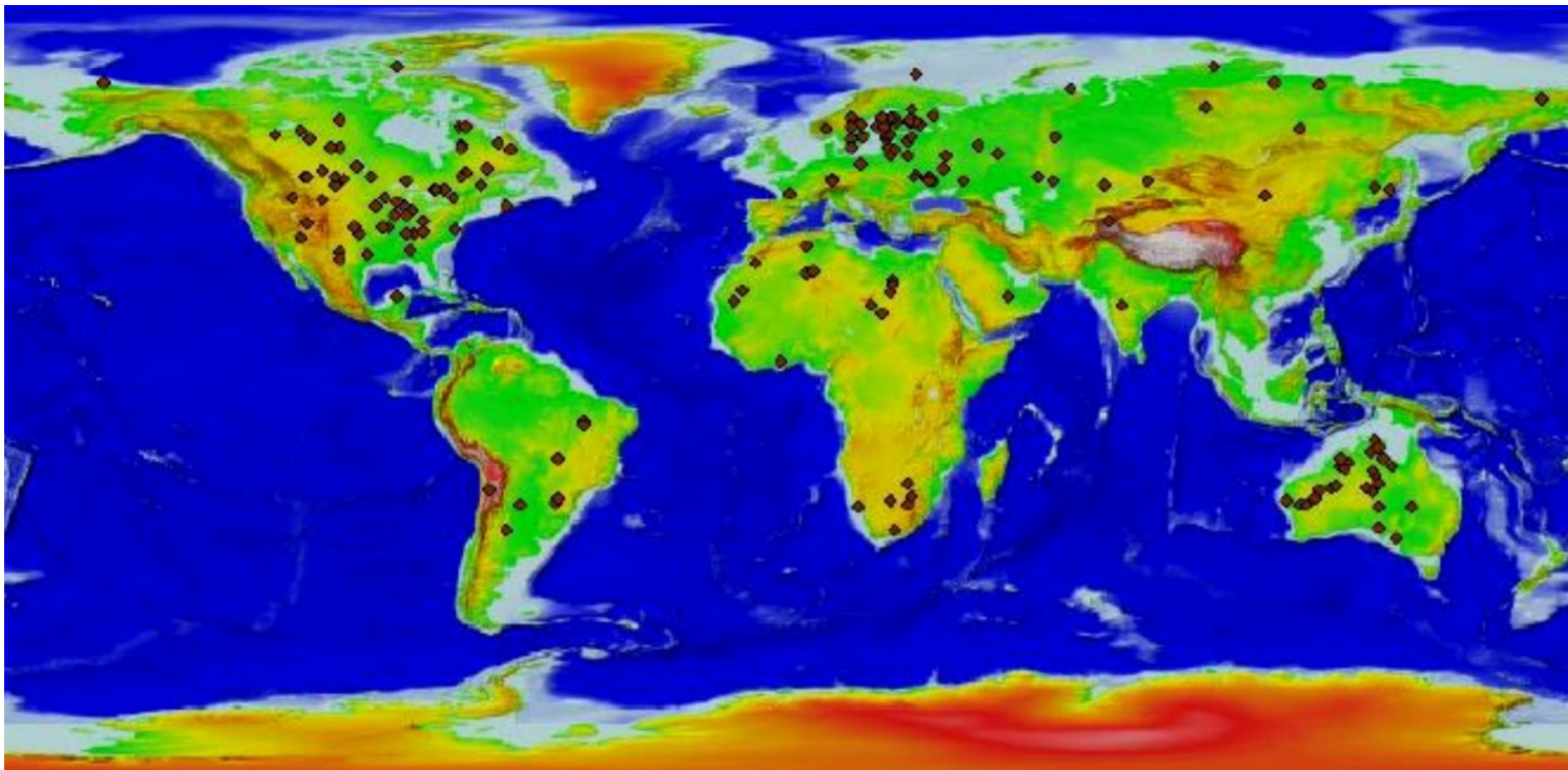


Pequeno resto do asteroide que causou a cratera de Barringer:

**Meteorito de Holsinger**

É o maior fragmento descoberto do meteorito que causou a Cratera de Barringer. É metálico, com peso = 639 kg e comprimento = 90 cm.

São conhecidas 128 crateras de impacto na Terra



Maior cratera do Brasil: Domo de Araguainha (na divisa entre Mato Grosso e Goiás)



# Cratera de Colônia, na zona Sul de São Paulo

Diâmetro = 3,6 km, prof. = 300m  
Asteroide ~180 m?

Claudio Riccomini et al., 2009

<http://sigep.cprm.gov.br/sitio116/sitio116.pdf>

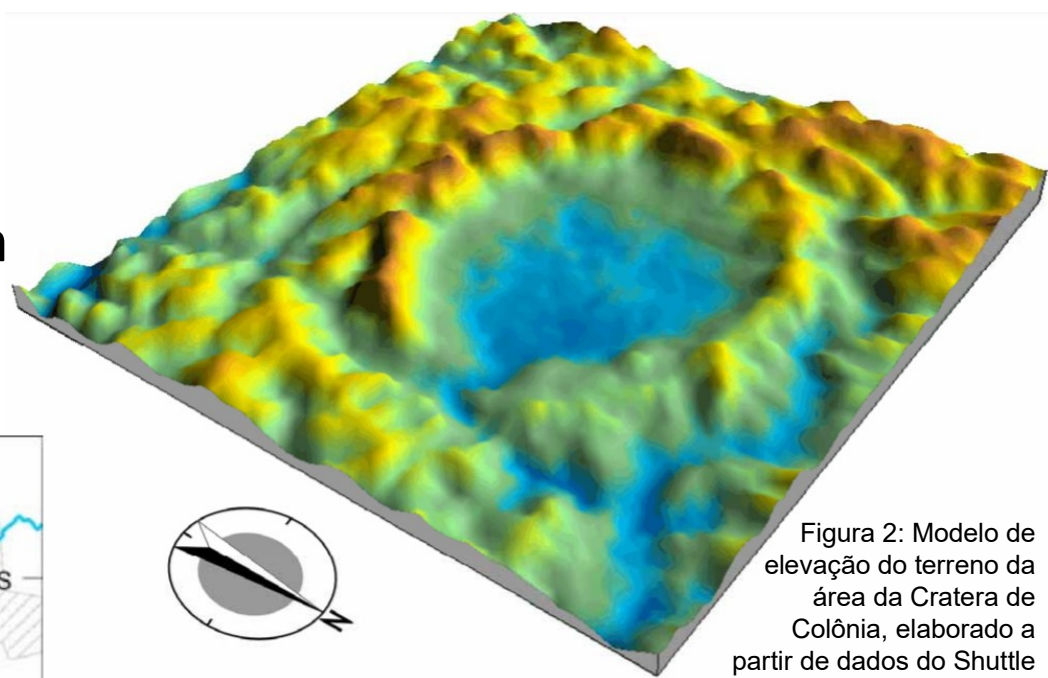


Figura 2: Modelo de elevação do terreno da área da Cratera de Colônia, elaborado a partir de dados do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), United States Geological Survey (USGS), 2002.

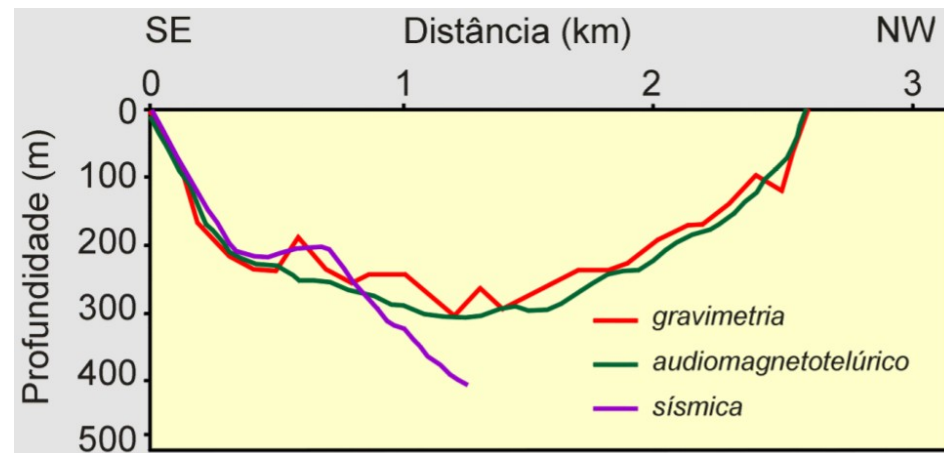
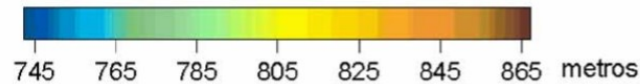
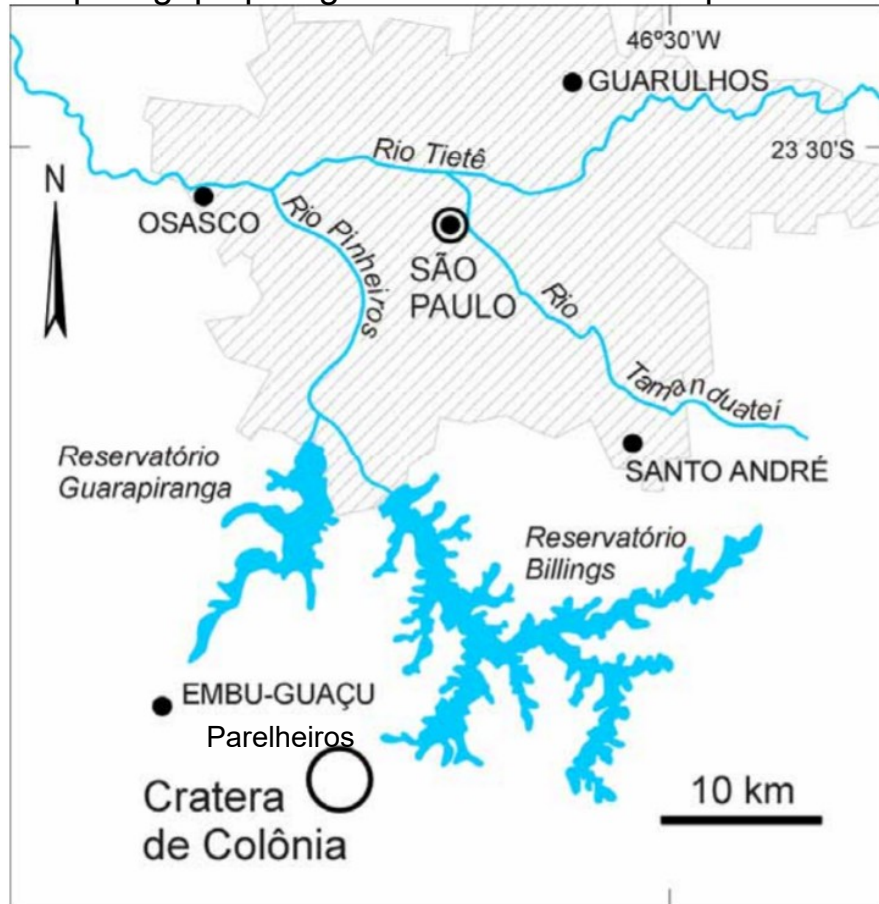


Figura 4: Seção de direção NW-SE da Cratera de Colônia elaboradas a partir de dados geofísicos (Riccomini et al., 1992 e Neves, 1998, modificados)



# Cratera de Chicxulub (Yucatán, México)

Diâmetro = 180 km

Profundidade = 20 km

Idade = 66 milhões de anos

Causado por asteroide de 10 km



# Observatório Astronômico do Sertão de Itaparica (OASI)



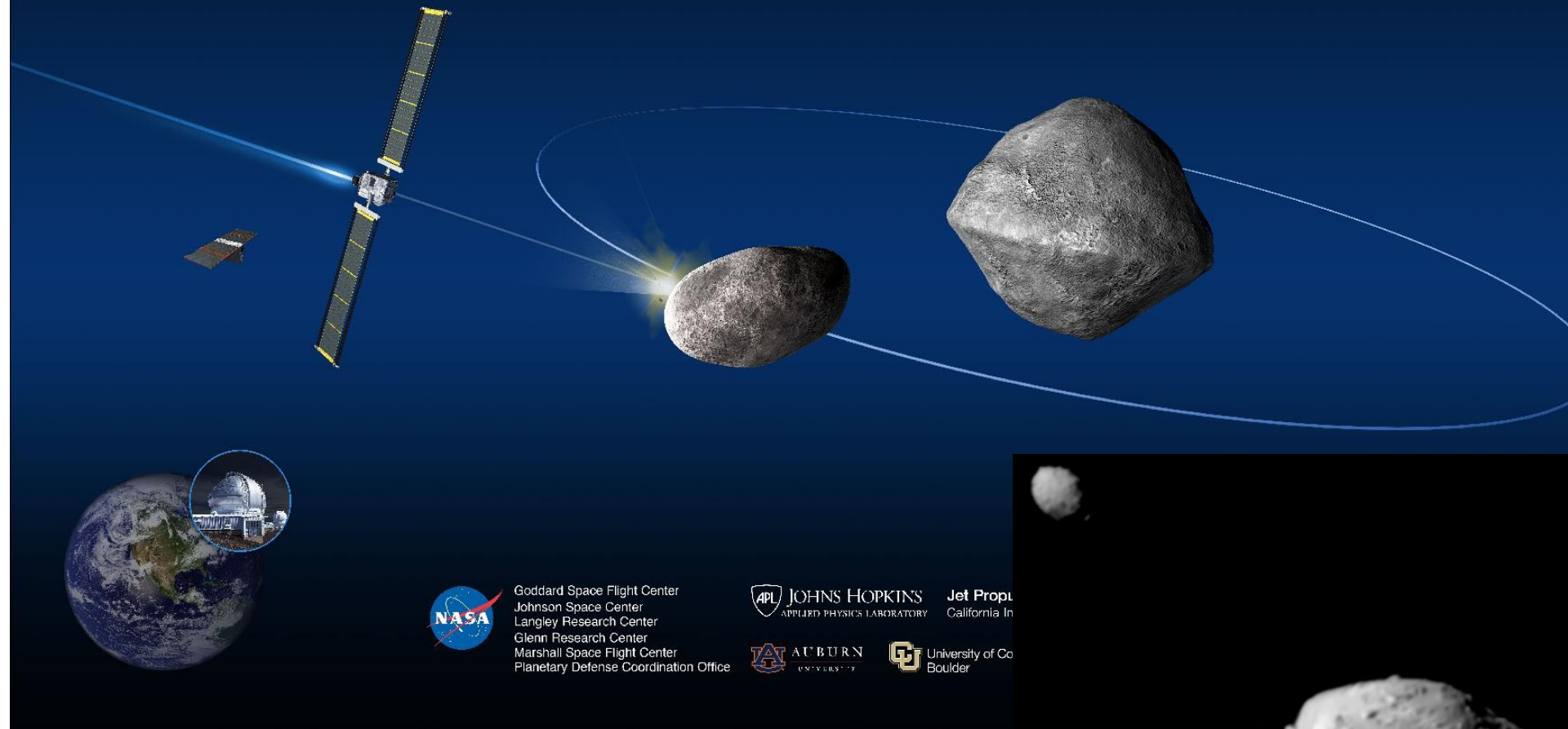
## Iniciativa de Mapeamento e Pesquisa de Asteroides nas Cercanias da Terra no Observatório Nacional

<http://impacton.on.br/>



Projeto de telescópio de 1m coordenado pela Dra. Daniela Lazzaro do Observatório Nacional - RJ

O projeto **IMPACTON** tem como objetivo a instalação e operação de um observatório astronômico dedicado à pesquisa de pequenos corpos do Sistema Solar. Esta iniciativa integra o Brasil aos programas internacionais de busca e seguimento de asteroides e cometas em risco de colisão com a Terra e fortalece a atuação nacional do ON.



Goddard Space Flight Center  
Johnson Space Center  
Langley Research Center  
Glenn Research Center  
Marshall Space Flight Center  
Planetary Defense Coordination Office



JOHNS HOPKINS  
APPLIED PHYSICS LABORATORY

Jet Propul  
California In



AUBURN  
UNIVERSITY



University of Co  
Boulder



65803 **Didymos**. Mean diam. 780 m,  $\rho = 2.2 \text{ g/cm}^3$   
Aphelion 2.27 AU Perihelion 1.013 AU

**Dimorphos**. Mean diam. 171 m.  $a = 1.19 \text{ km}$   
P = 11h55m (pre-impact) 11h23m (post-impact)

Dimorphos alguns segundos antes do impacto, 26/9/2022

2 segundos antes do impacto da DART, a uma  $v = 24\ 000$  km/h

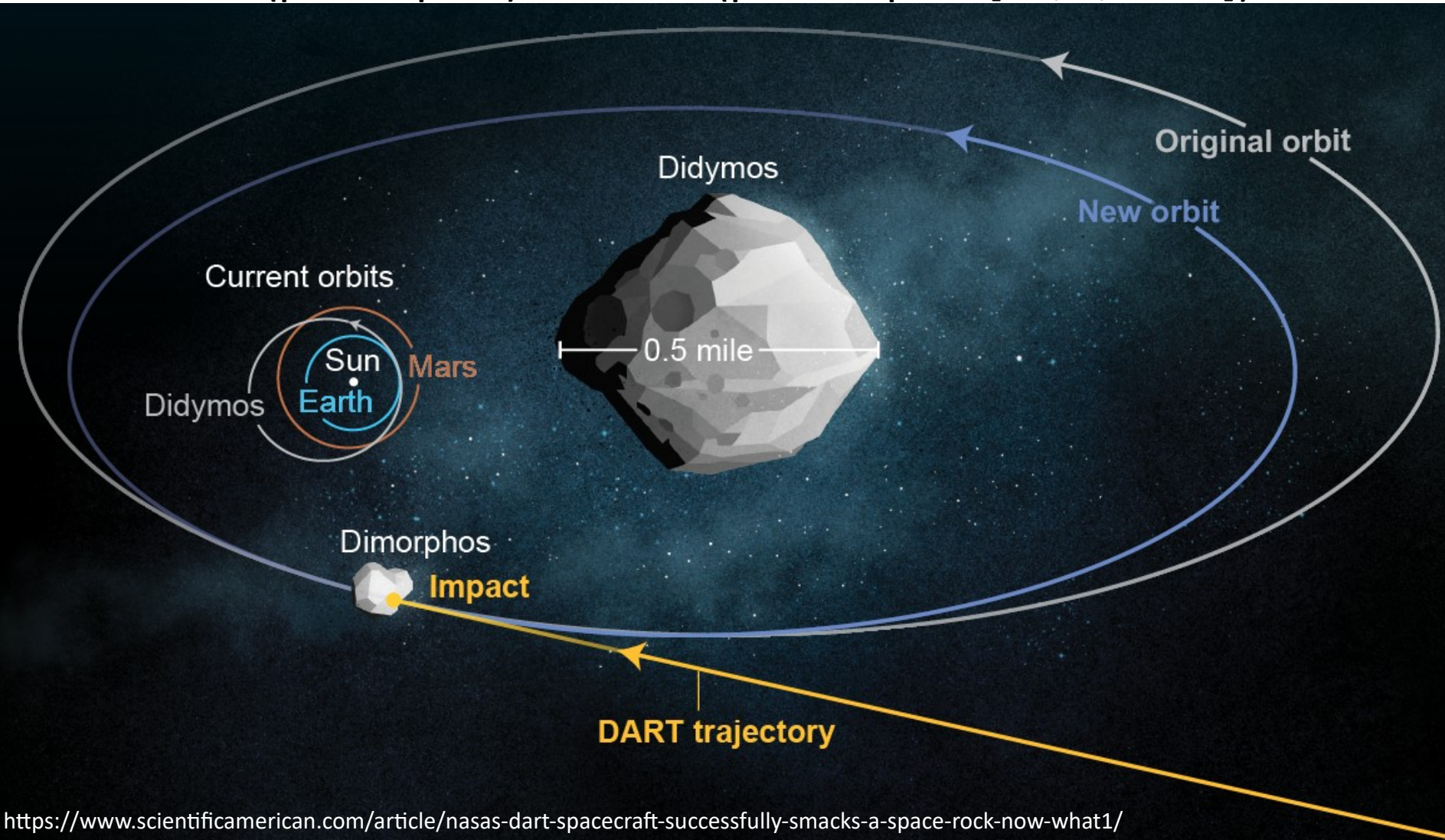


65803 **Didymos**. Mean diameter 780 m,  $\rho = 2.2 \text{ g/cm}^3$

Aphelion 2.27 AU Perihelion 1.013 AU

**Dimorphos**. Mean diameter 171 m.  $a = 1.19 \text{ km}$

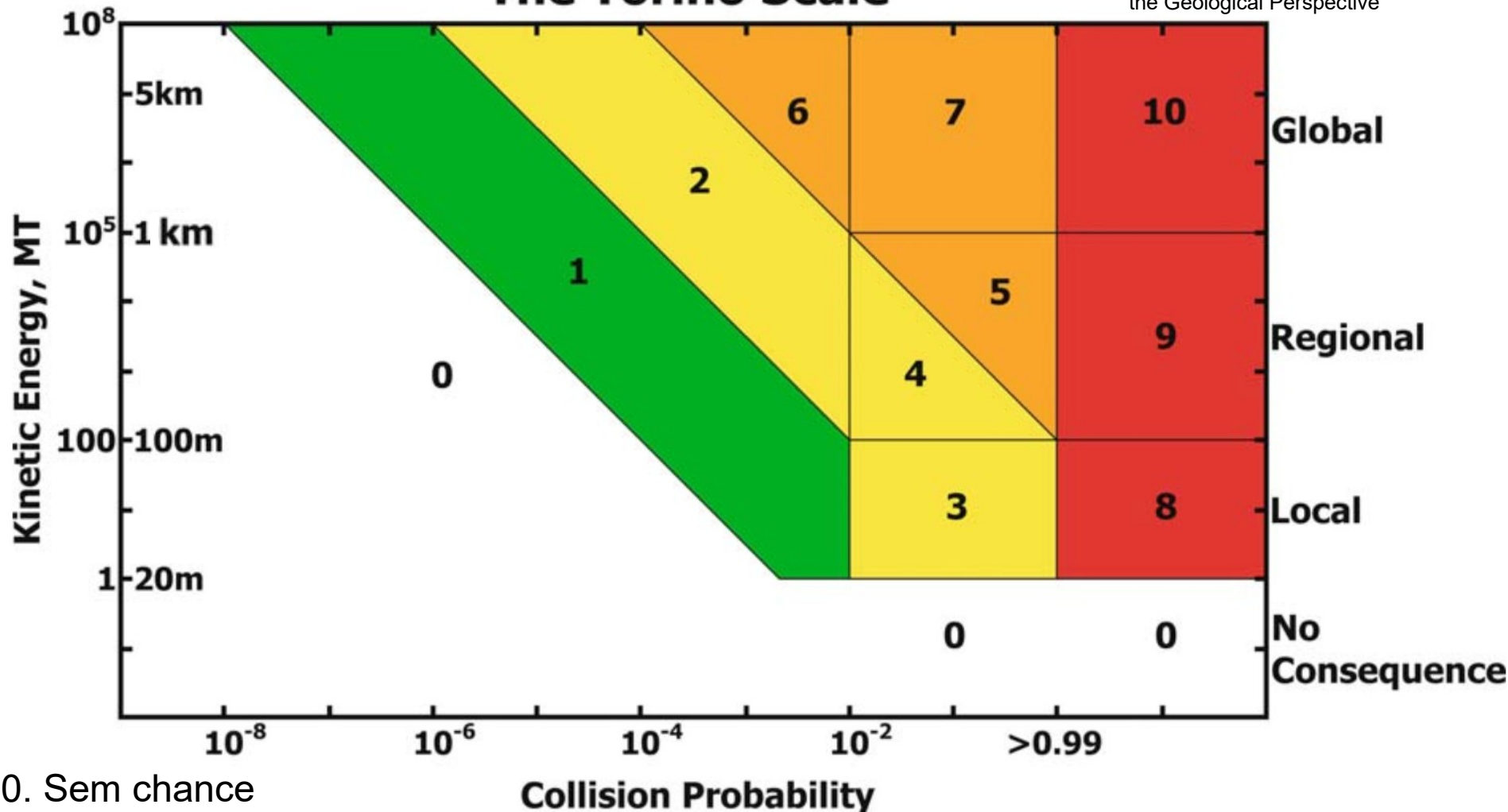
$P = 11\text{h}55\text{m}$  (pre-impact)  $11\text{h}23\text{m}$  (post-impact [26/9/2022])



# Escala de Turim: potencial destrutivo de cometas e asteroides

## The Torino Scale

(c) Introduction to Planetary Science,  
the Geological Perspective



0. Sem chance

2-4: baixa chance

5-7: alta chance de colisão e destruição.

8-10: colisão é praticamente garantida. Danos locais (8), regionais (9) ou catástrofe global (10). Um evento desta magnitude (10) ocorre uma vez a cada ~100 000 anos.



President Janie Orlean (Meryl Streeep): "So, how certain is this?"

Dr. Mindy (Leonardo DiCaprio): "There's 100% certainty of impact"

President: "Please, don't say 100 percent."

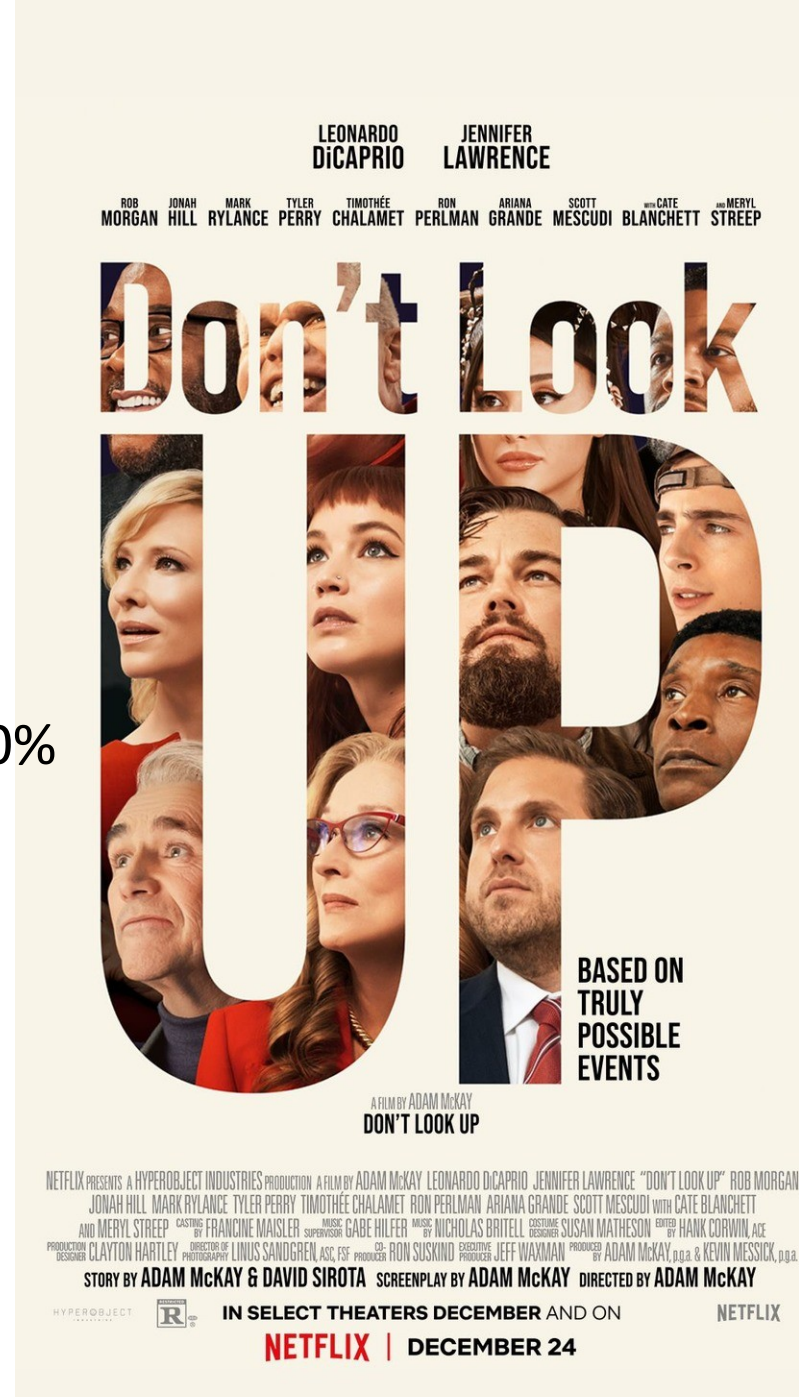
Dr. Mindy: "99.78%, to be exact."

Chief of Staff: "Oh, great ... it's not 100%."

President: "I'm gonna call it 70%, and let's just, let's move on."

<https://www.imdb.com/title/tt11286314/characters/nm0000138>

<https://www.scientificamerican.com/article/dont-look-up-illustrates-5-myths-that-fuel-rejection-of-science/>





# Terminologia relacionada a asteroides e meteoritos

# Meteoro: luz na atmosfera causada pela entrada de meteoroides

TERMINOLOGIA DOS METEOROS APROVADA PELA IAU EM 2017

AMERICAN METEOR SOCIETY - WWW.AMSMETEORS.ORG

**ASTEROIDE**  
Corpos rochosos e metálicos que possuem órbita definida ao redor do Sol. Fazem parte dos corpos menores do sistema solar. Tamanho de 1 metro até centenas de quilômetros.



**Asteroide:**  
1 m – 939 km

**Cometa:** corpo gelado com núcleo de 100 m a 100 km. Libera gases ao se aproximar do Sol

**COMETA**  
Corpo sólido constituído por gelo, rochas e gases congelados. Fragmentos de sua constituição são deixados ao longo de sua trajetória em órbita do do sol. Composto por um núcleo, coma e cauda.

**METEOROIDE**  
Corpo sólido natural menor que um asteroide no espaço interplanetário. Tamanho de 30 microns a 1 metro.

**Meteoroide:**  
30 µm – 1 m

**CHUVA DE METEORO**  
Evento periódico anual causado pela entrada de pequenos fragmentos de cometa quando a Terra cruza a órbita desses corpos. Recebem o nome da localidade ou constelação do céu (radiante), na qual os meteoros se originam.

**Chuva de meteoros:** fenômeno que ocorre quando a Terra cruza pelos

pequenos detritos deixados por cometas nas suas órbitas

**“Bola de fogo”:**  
meteoro mais brilhante que Vênus

**BÓLIDO** ou **FIREBALL** “BOLA DE FOGO”  
Meteoro mais brilhante do que Vênus (magnitude visual -4) a uma distância de 100 km. O bólido indica um evento explosivo.

**Bólido:** meteoro 2 vezes mais brilhante que a Lua cheia (< - 14) e que explode

**SUPERBÓLIDO**  
Meteoro mais brilhante do que uma magnitude visual de -17. Indica provável geração de meteoritos.

**Superbólido:** meteoro 100 vezes mais brilhante que a Lua cheia (< - 17). Explode e provavelmente gera meteoritos

**METEORITO**  
Material remanescente de um corpo sólido natural como meteoróide ou asteroide, grande o suficiente para sobreviver à entrada na atmosfera e atingir o solo.

**METEORO**  
Luz e fenômenos associados (calor, choque ionização) causado pela entrada em alta velocidade de um objeto sólido proveniente do espaço em uma atmosfera gasosa. São popularmente conhecidos como “Estrelas cadentes”.

Conceito: Mike Hankey - Design: Perlerin para AMS - Tradução e adaptação: Andre Moulinho para BRAMON



**Meteorito:** remanescente de meteoróide ou asteroide que sobrevive a entrada e atinge o solo

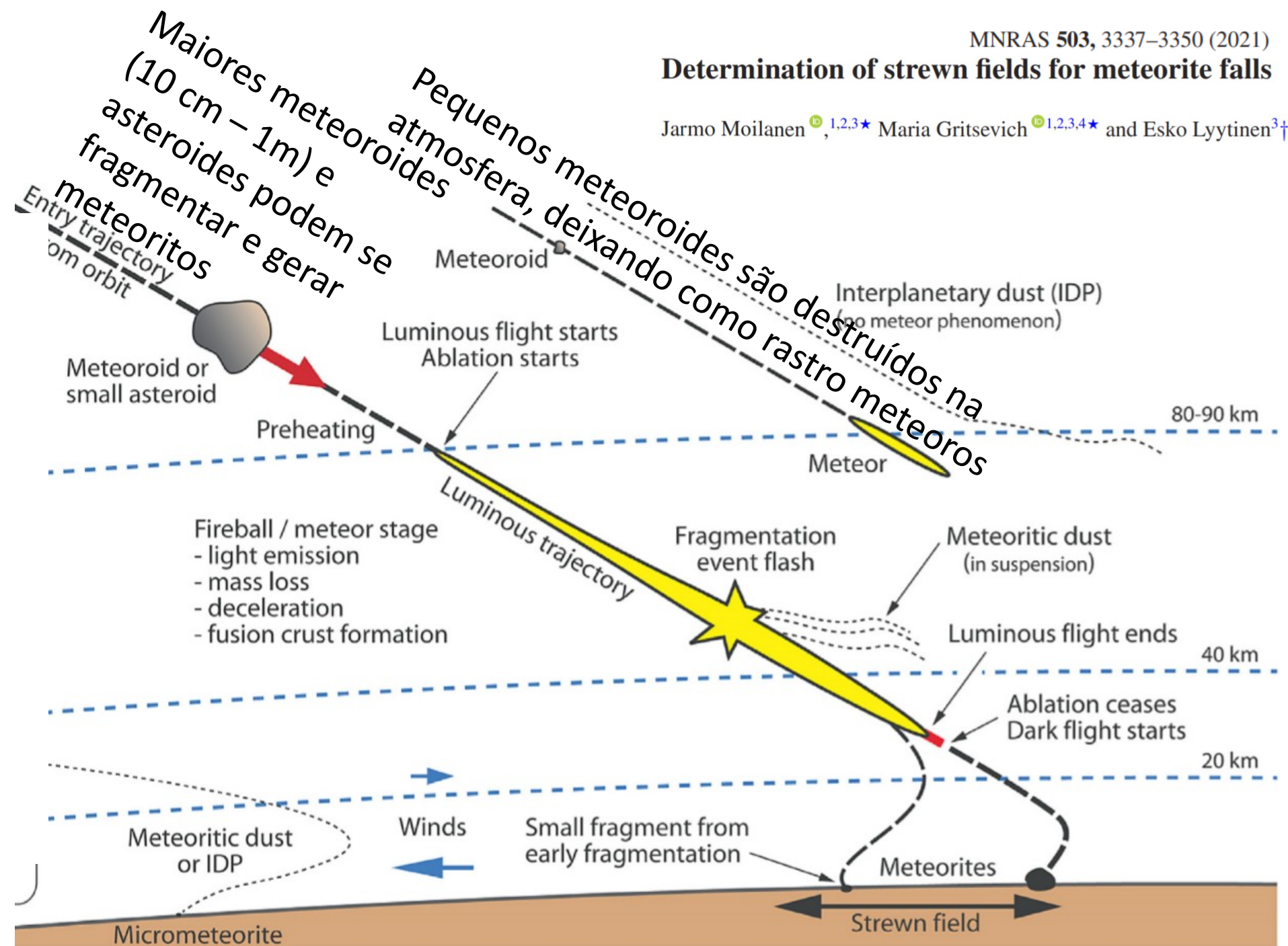
Imagem  
composta de  
chuva de  
meteoros  
Gemínidas sobre  
o Observatório  
Xinglong.  
É possível  
observar um  
meteoro “bola  
de fogo”.

(c) Steed Yu,  
12/2015

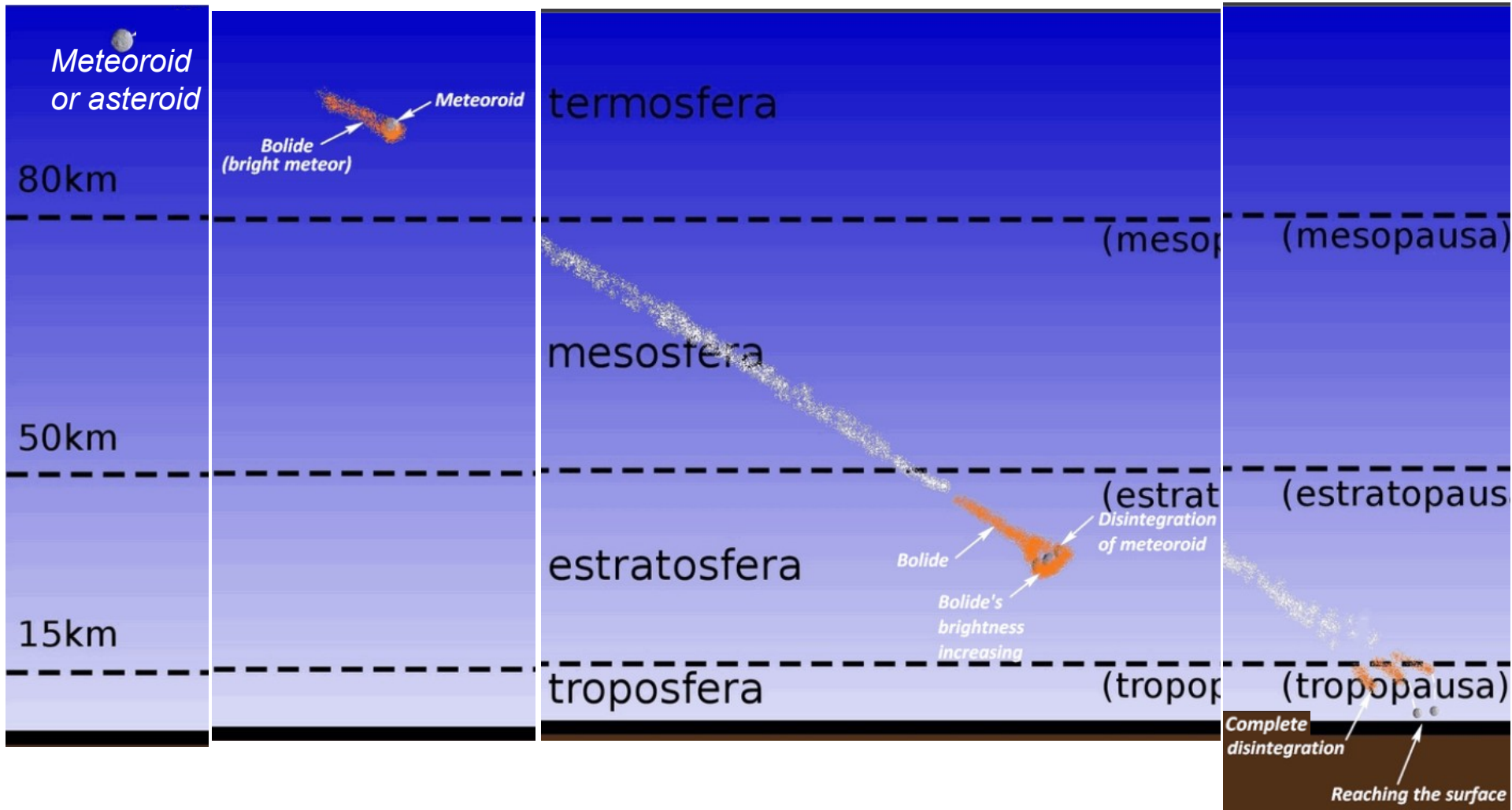


# Determination of strewn fields for meteorite falls

Jarmo Moilanen<sup>1,2,3</sup>\*, Maria Gritsevich<sup>1,2,3,4</sup>\* and Esko Lyytinen<sup>3</sup>†

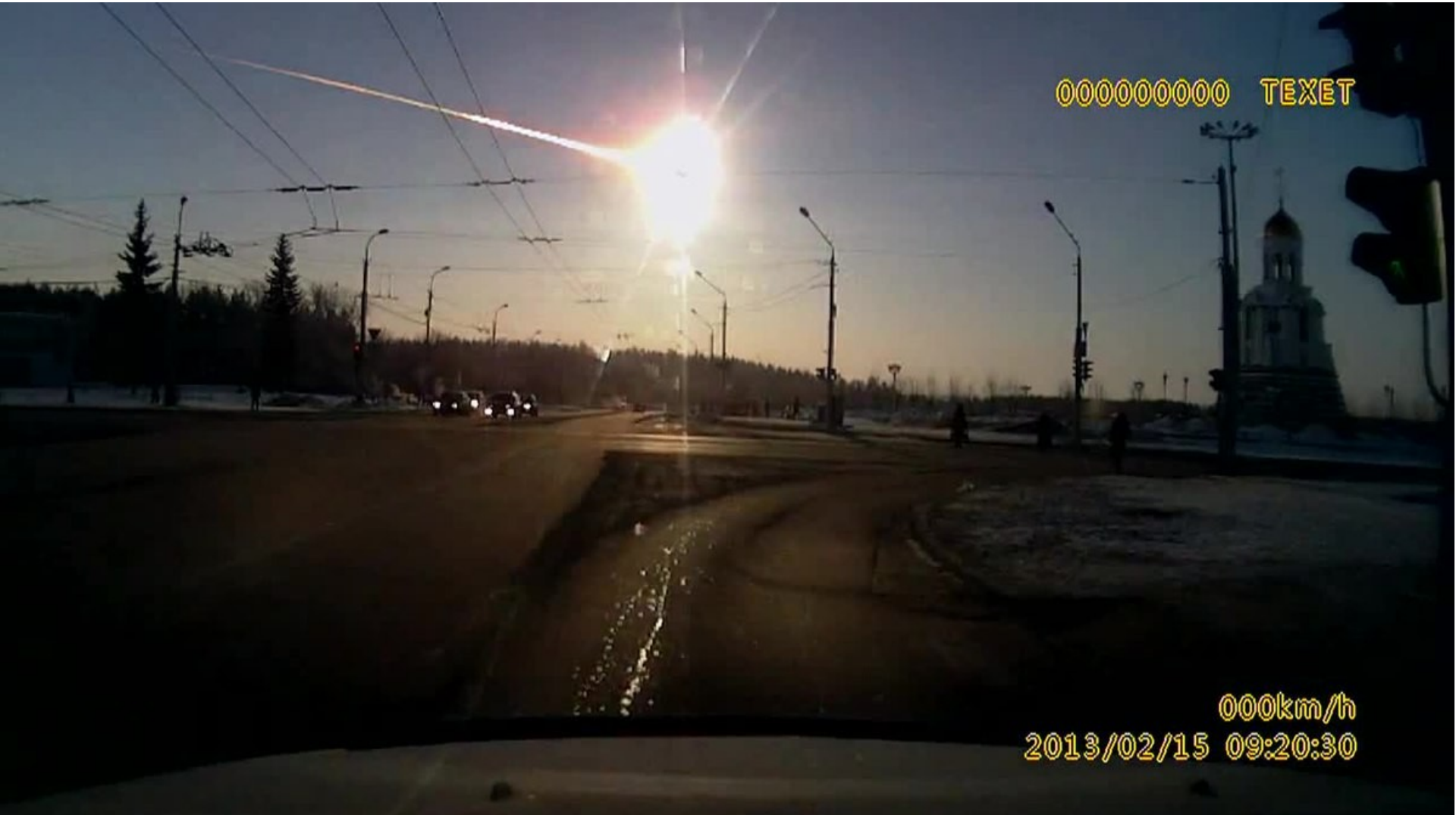


# Fases da entrada do meteoróide ou asteroide até a explosão e geração de meteoritos



*Meteoritos são os fragmentos da explosão que não se desintegraram e alcançaram o solo*

Superbólide de Tcheliabinsk (Chelyabinsk ), 15/2/2013  
Por instantes ficou tão brilhante como o Sol (-27)!  
Asteroide de ~20 m com velocidade relativa à Terra = 19 km/s



O evento foi visível a grandes distâncias.

A foto mostrando o rastro na atmosfera foi tirada a 200 km de distância

Date: 15 February 2013, 09:24:09

Author: Alex Alishevskikh



Onda de choque quebrou muitos vidros.

1491 pessoas procuraram atendimento médico. 112 hospitalizadas



Os meteoritos encontrados são do tipo condrito ordinário e contém 10% de ferro.

Fragmento de 112 g do meteorito Chelyabinsk, encontrado em um campo entre as aldeias de Deputatsky e Emanzhelinsk em 18/fev/2013. O cubo da escala é de 1 cm.





Fragmento recuperado do lago  
Chebarkul em 16/10/2013.  
Deixou buraco de 6m no lago.  
Comprimento ~1 m e massa 650 kg

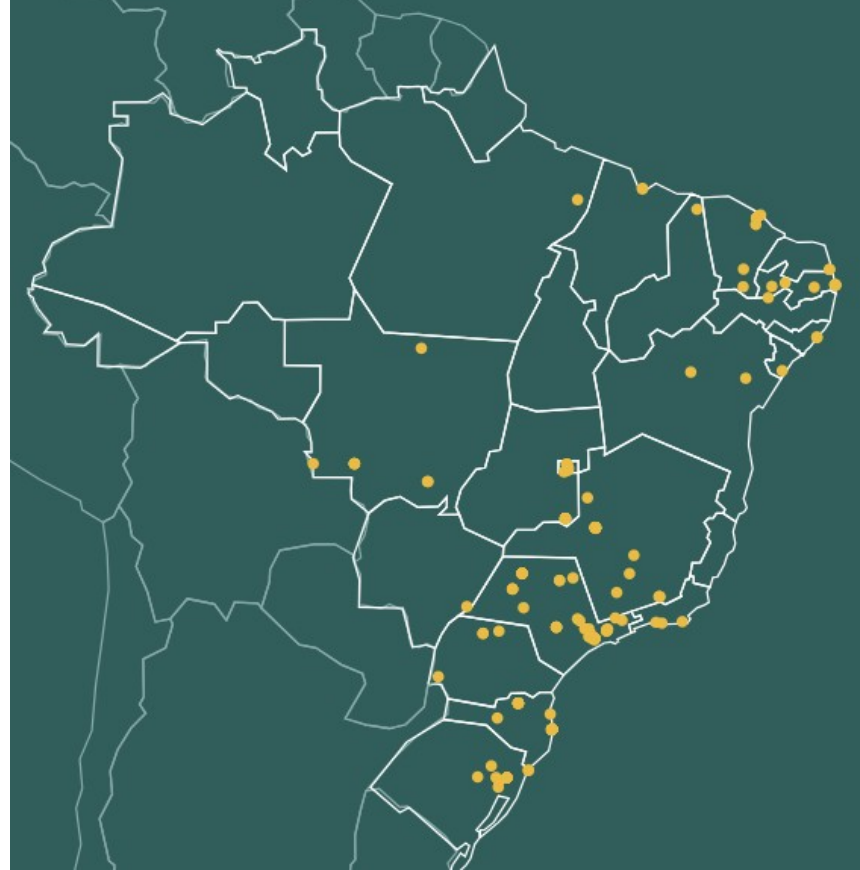


<https://www.bbc.com/news/science-environment-24550941>

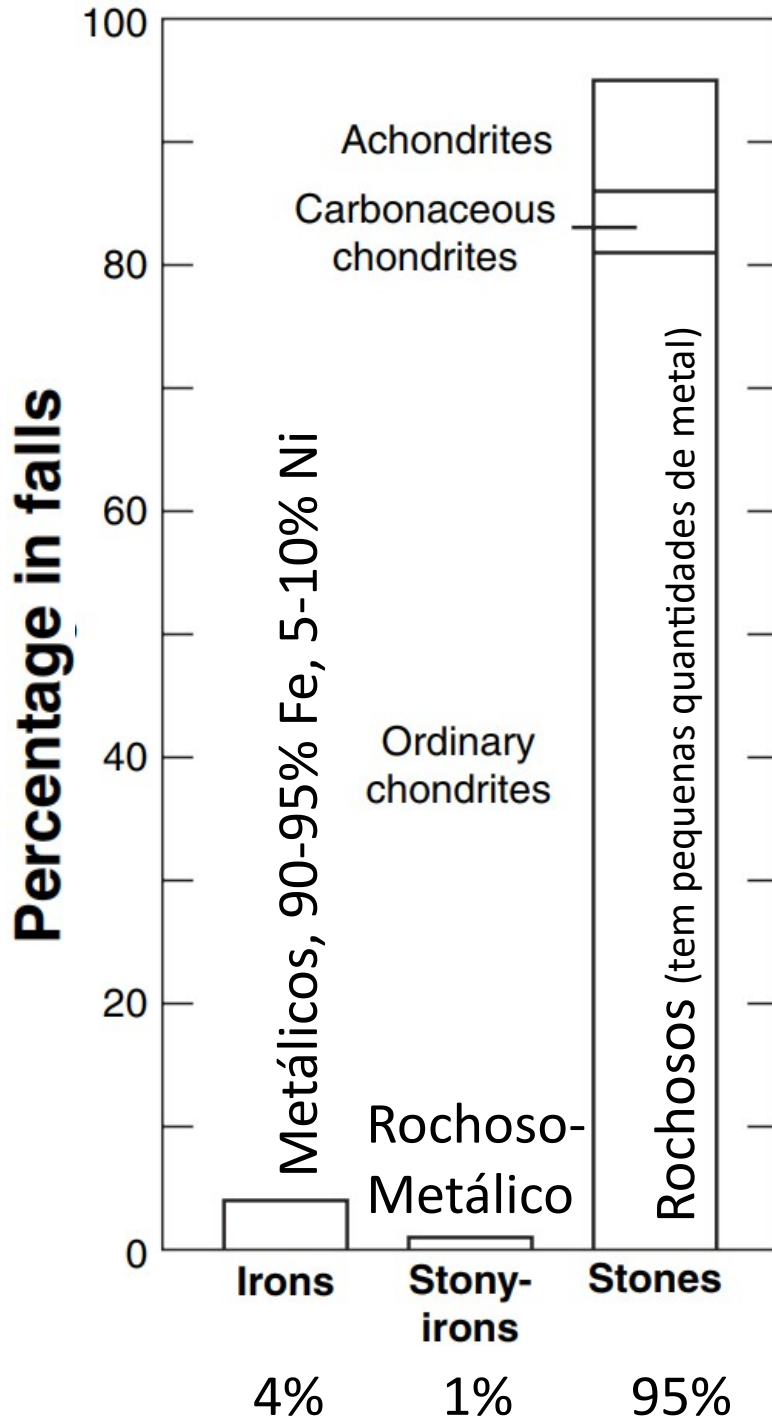




- Realizar a captura de meteoros em imagens para astrometria e cálculo de suas órbitas;
- Colaborar na catalogação de novos riantes de chuvas de meteoros;
- Realizar análises espectrográficas de meteoros;
- Triangular possíveis locais de quedas de meteoritos;
- Coletar dados referentes a outros fenômenos que possam ser captados pelas estações; e
- Agregar a colaboração pública e de instituições de ensino básico e superior para tornar a rede uma ferramenta de ensino e divulgação.



# Tipos de meteoritos



Acondritos, 9%

Condritos  
carbonáceos, 5%

Condritos  
ordinários  
81%

Rochas com  
côndrulos  
(fragmentos  
quase esféricos  
compostos  
principalmente  
por silicatos  
minerais como  
olivinas  
(Mg,Fe)SiO<sub>4</sub> e  
piroxênios  
(Mg,Fe)SiO<sub>3</sub>

## Condritos ordinários (81%)



O condrito NWA 869 mostra fragmentos de metal e côndrulos (objetos milimétricos quase esféricos, ricos em silicatos minerais como olivinas  $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_4$  e piroxênios  $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$

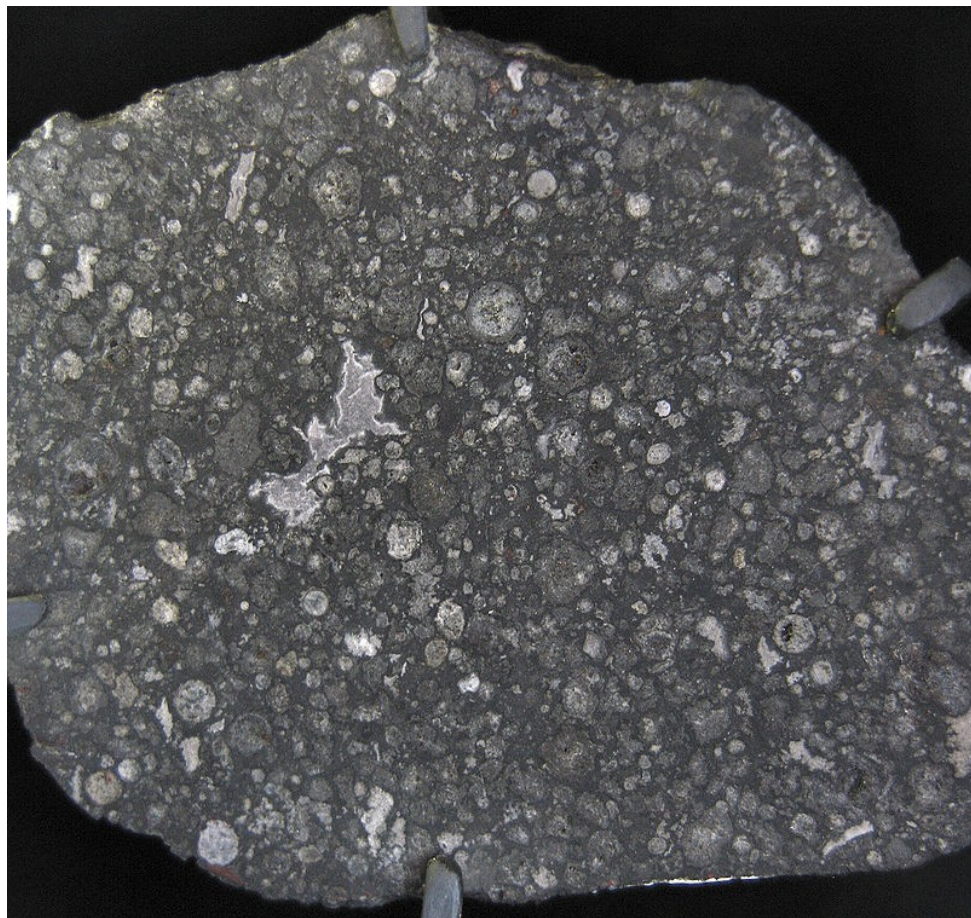
Origem em alguns asteroides específicos

<https://en.wikipedia.org/wiki/Chondrite>

A 700g individual of the NWA 869 meteorite. Chondrules and metal flakes can be seen on the cut and polished face of this specimen. NWA 869 is a ordinary chondrite (L4-6).

## Condritos carbonáceos (5%).

- Classes CI e CM não foram expostos a altas temperaturas
- Apresentam alto teor ( $\leq 3\%$ ) de carbono
- Vários grupos: CI, CM, CV, CO, CR, CK e CH



CI [ou C1]: Ivuna (Tanzânia).

CM: Mighei, (Ucrânia), o mais famoso é o Murchison

CV: Vigarano (Itália)

CO: Ornans (França)

CR: Renazzo (Itália)

CK: Karoonda (Austrália)

CH: alto teor ( $>50\%$ ) de NiFe

Fatia do meteorito Allende (tipo CV) mostrando côneulos circulares.

[https://en.wikipedia.org/wiki/Carbonaceous\\_chondrite](https://en.wikipedia.org/wiki/Carbonaceous_chondrite)

A slice from the 4.5-billion-year-old Allende meteorite. This rock was formed along with the solar system.

# Condritos carbonáceos

## CI (Orgueil)

- composição ~Sol
- maior conteúdo volátil (até 22% H<sub>2</sub>O)
- baixa  $\rho$  (2,2 g/cm<sup>3</sup>)
- quase sem côndrulos
- compostos orgânicos



<https://karmaka.de/?p=20742>



## CM (Murchison) / CV (Allende)

- 2 a 16% H<sub>2</sub>O ligada a minerais
- côndrulos visíveis
- inclusões ricas em cálcio e alumínio (IRCAs)
- compostos orgânicos

## Murchison meteorite, 28/9/1969

[https://en.wikipedia.org/wiki/Murchison\\_meteorite](https://en.wikipedia.org/wiki/Murchison_meteorite)



IRCAs são associadas à condensação inicial do S.S.

## CO

- Só 1% de H<sub>2</sub>O ligada a minerais
- Composição similar a CV, porém mais escuros
- côndrulos e IRCAs

## Moss meteorite, 14/7/2006

[https://en.wikipedia.org/wiki/Moss\\_meteorite](https://en.wikipedia.org/wiki/Moss_meteorite)



Inclusões ricas em cálcio e alumínio (IRCAAs).

Por exemplo grãos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (corundum),  $\text{CaO}$  (óxido de cálcio) e  $\text{CaTiO}_3$  (perovskita = óxido de cálcio e titânio)

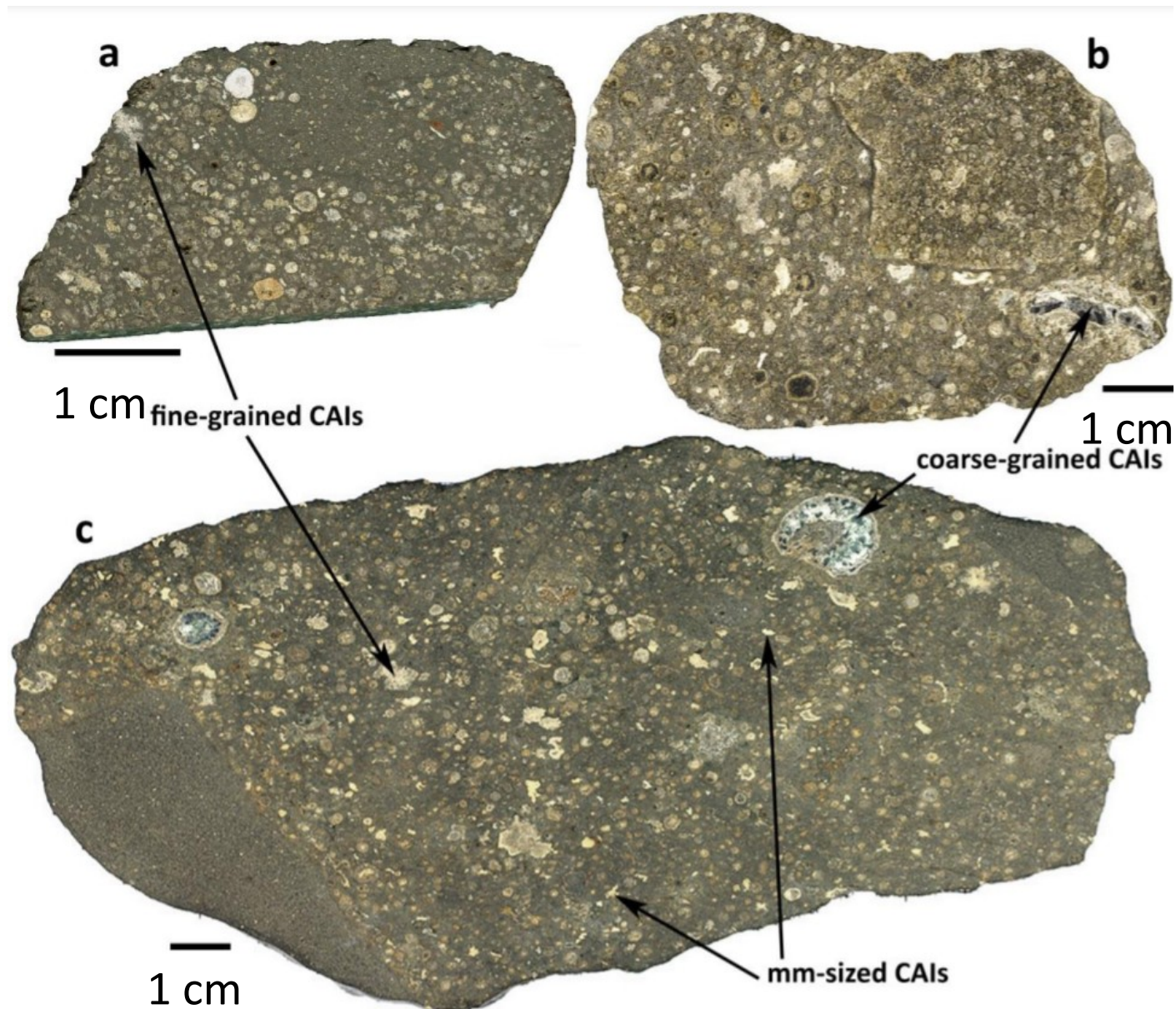
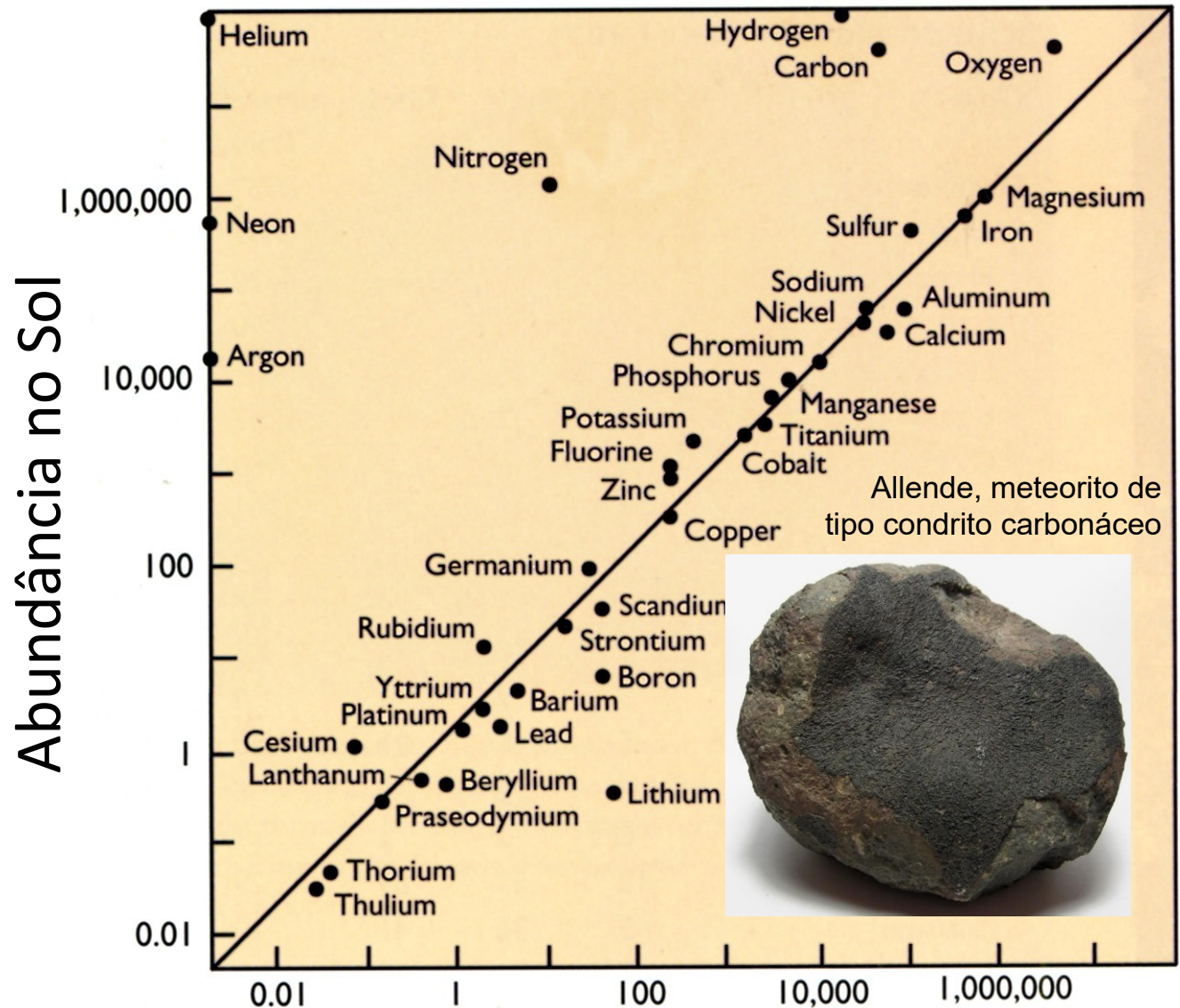


Figure 1: Representative scanned slabs of CV and CK carbonaceous chondrites used to establish the CAI size distributions in Chaumard et al. (2014) & the present study. (a) Allende, (b) NWA 2900, and (c) TNZ 057. Scale bars are 1 cm. Numerous CAIs are visible as whitish inclusions, with several examples of cm-sized and mm-sized CAIs labeled with arrows. Dark mm-sized grains of pyroxene are visible within coarse-grained CAIs and grains are indistinguishable in fine-grained CAIs. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1503/1503.07233.pdf>

# Abundância no Sol vs. Meteorito de Allende

A composição química do Sol está em excelente acordo com a do meteorito encontrado em Allende (México), exceto para elementos voláteis como H, He, C, N e O.



Abundância no meteorito de Allende (tipo CV)



## Acondritos (9%)

Não apresentam côndrulos.

Provavelmente foram formados de corpos diferenciados.

A cor escura é pelo aquecimento na passagem pela atmosfera terrestre.



A 175g individual of the Millbillillie meteorite shower, a eucrite achondrite that fell in Australia in 1960. This specimen is approx. 6 centimeters wide. Note the shiny black fusion crust with flow lines. The chip at lower right allows one to see the light-gray interior. The orange staining at top is a result of weathering, as these stones were not recovered until many years after they fell.

Meteoritos metálicos (4%).

Origem no núcleo de objeto diferenciado.

Compostos principalmente de ferro (90%) e níquel (10%).



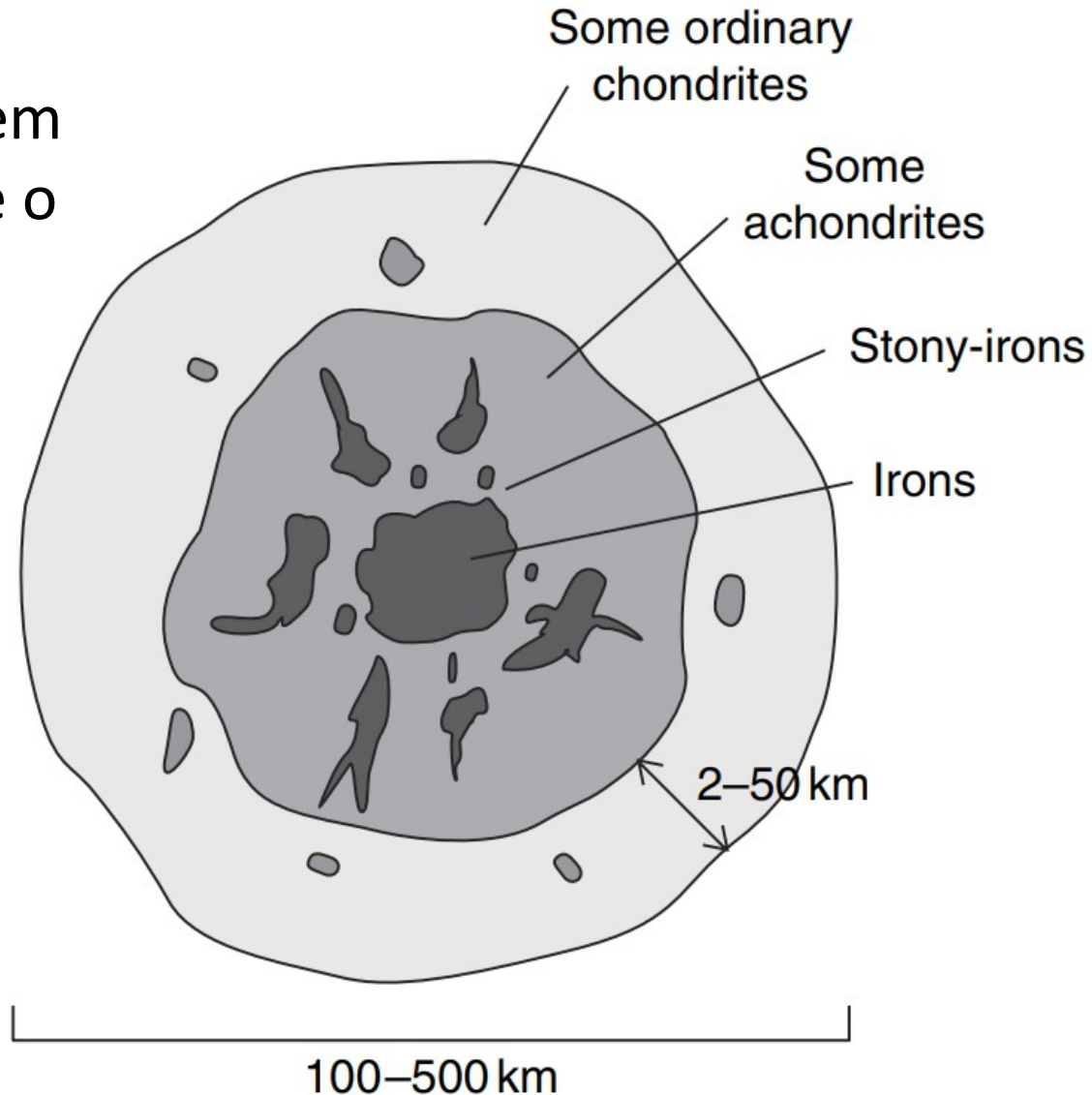
The Sikhote-Alin iron meteorite

A 1.7kg individual meteorite from the Sikhote Alin meteorite shower. This specimen is about 12cm wide. Sikhote Alin meteorite shower fell on 1947 February 12 in the dense forest of eastern Siberia, and over 23 tons of meteoritic material has been recovered. (c) H. Raab

# Meteorito rochoso-metálico (1%)

Mistura de ferro-níquel e minerais de silicato. Origem no limite entre o núcleo e o manto de um objeto diferenciado.

[https://en.wikipedia.org/wiki/Stony-iron\\_meteorite](https://en.wikipedia.org/wiki/Stony-iron_meteorite)

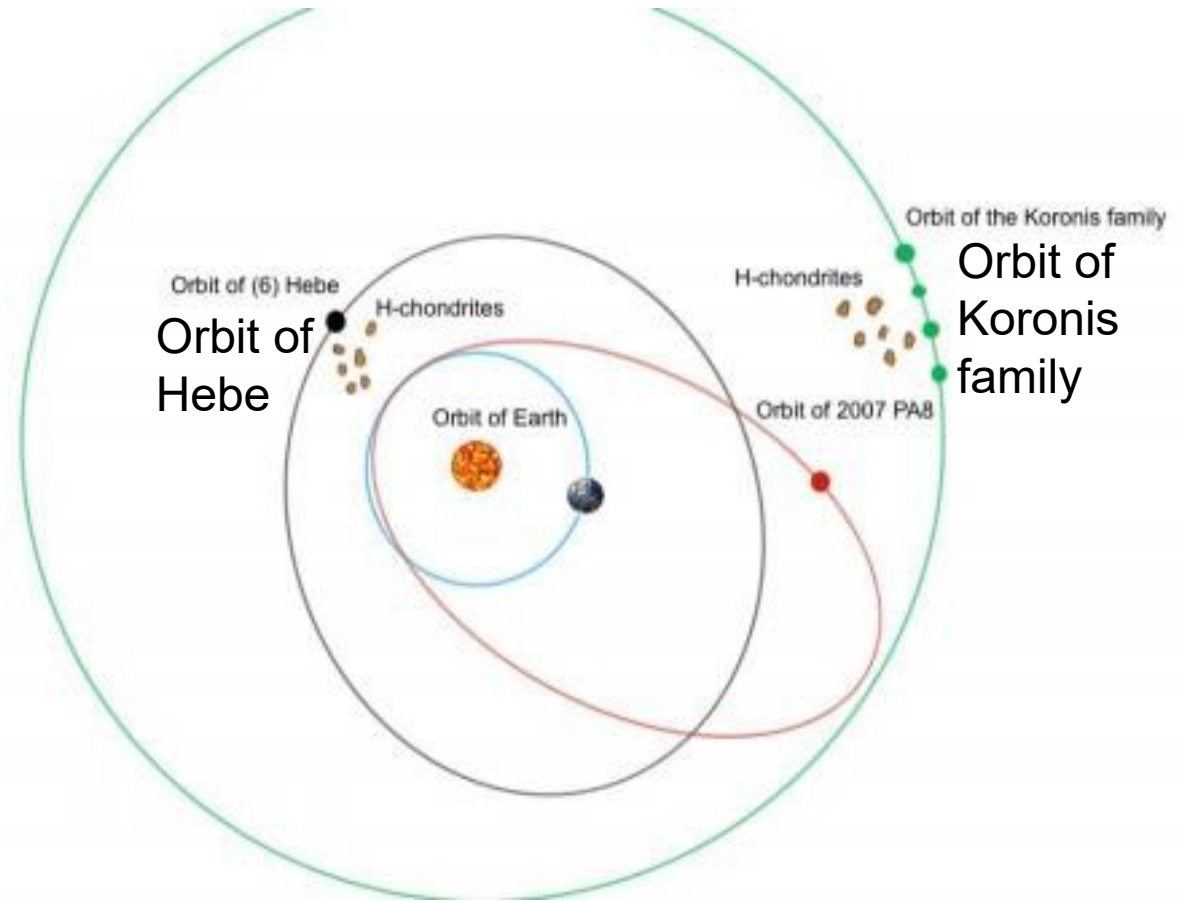


A slice of the Esquel meteorite showing the mixture of meteoric iron and silicates, typical of this class

# Órbitas de origem de meteoritos condritos ordinários



Hebe  
205 × 185 × 170 km  
Densidade ~3,5  
g/cm<sup>3</sup>



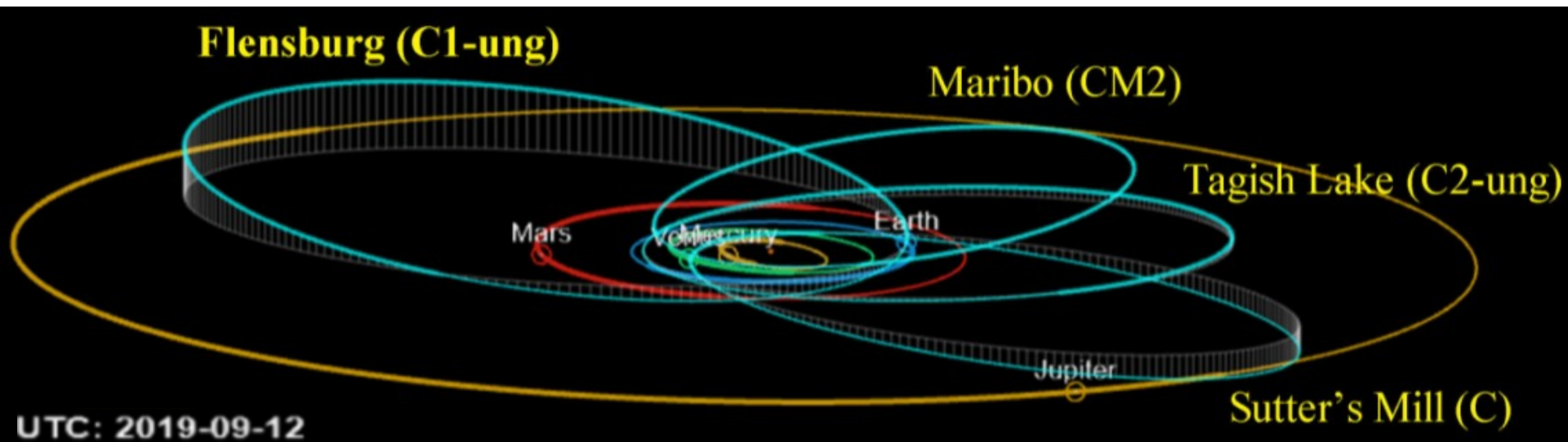
# Órbitas de condritos carbonáceos

Meteoritos CI não foi expostos a mais de 50°C → formado na região externa do Sistema Solar



Flensburg meteorite with black fusion crust. Credit: A. Bischoff and M. Patzek, University of Münster

<https://karmaka.de/?p=20742>



# Região de origem dos meteoritos

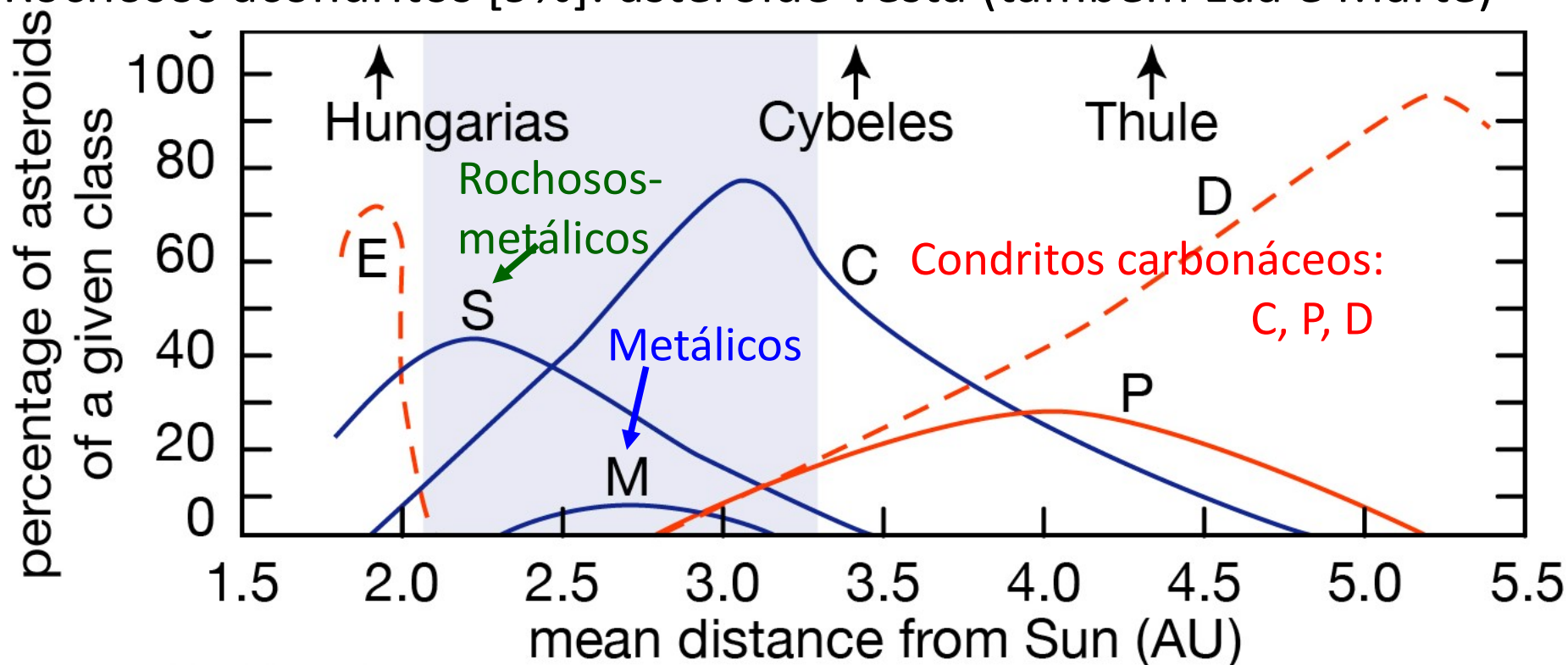
Metálicos [4%]: região de asteroides M

Rochosos-Metálicos [1%]: região de asteroides S

Rochosos condritos carbonáceos [5%]: região de asteroides C, P, D

Rochosos condritos ordinários [81%]: alguns asteroides

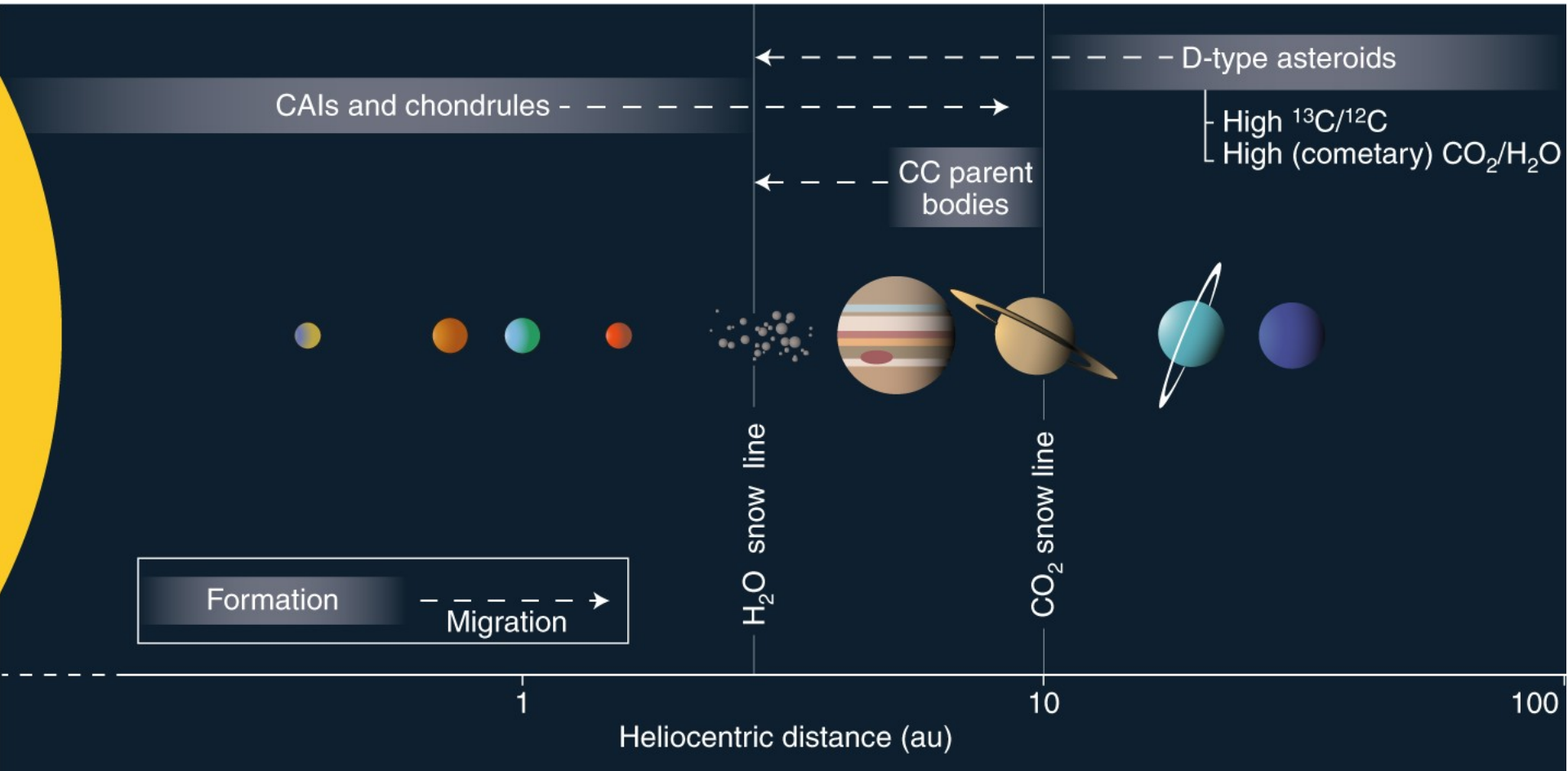
Rochosos acondritos [9%]: asteroide Vesta (também Lua e Marte)



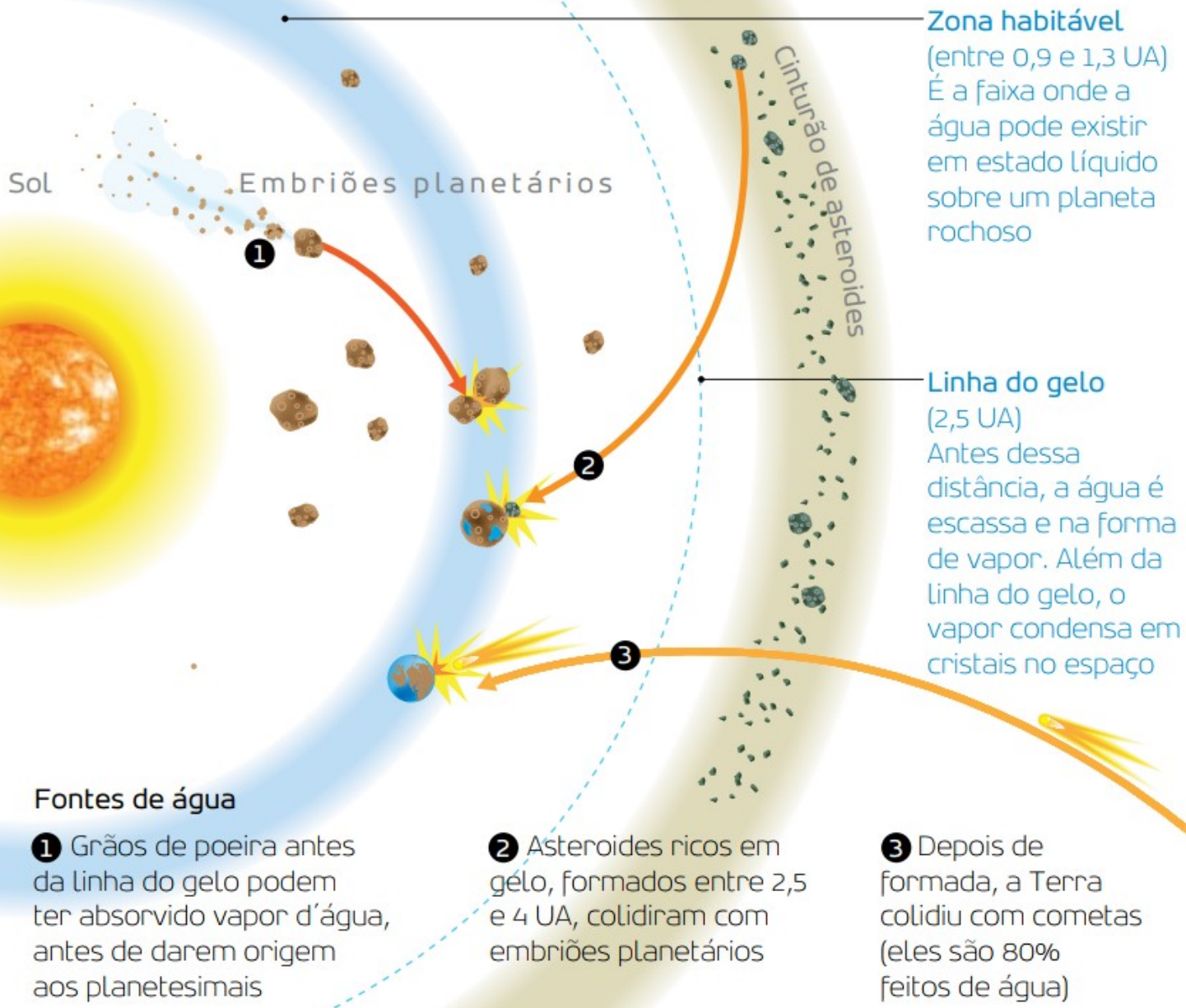
# The tumultuous childhood of the Solar System

[Yves Marrocchi](#) & [Laurette Piani](#)

*Nature Astronomy* **3**, 889–890 (2019) | [Cite this article](#)



A Terra se formou onde está hoje, a uma distância de 1 UA (unidade astronômica) do Sol, bem no meio da zona habitável, antes da linha do gelo



**Zona habitável**  
(entre 0,9 e 1,3 UA)  
É a faixa onde a água pode existir em estado líquido sobre um planeta rochoso

**Linha do gelo**  
(2,5 UA)  
Antes dessa distância, a água é escassa e na forma de vapor. Além da linha do gelo, o vapor condensa em cristais no espaço

**Fontes de água**

**1** Grãos de poeira antes da linha do gelo podem ter absorvido vapor d'água, antes de darem origem aos planetesimais

**2** Asteroides ricos em gelo, formados entre 2,5 e 4 UA, colidiram com embriões planetários

**3** Depois de formada, a Terra colidiu com cometas (eles são 80% feitos de água)

De onde vem a água da Terra.

Planetesimais contribuíram com apenas uma fração da água da Terra, pois a “linha de gelo” se encontra a ~2,5 - 3 U.A.



## A ORIGEM DA ÁGUA DA TERRA

**60%**

Água trazida por asteroides que colidiram com os embriões planetários que originaram a Terra

**2% a 5%**

Água que chegou pela chuva de cometas que atingiram a Terra recém-formada

**35% a 38%**

Água absorvida pelos grãos do disco que formaram os embriões planetários

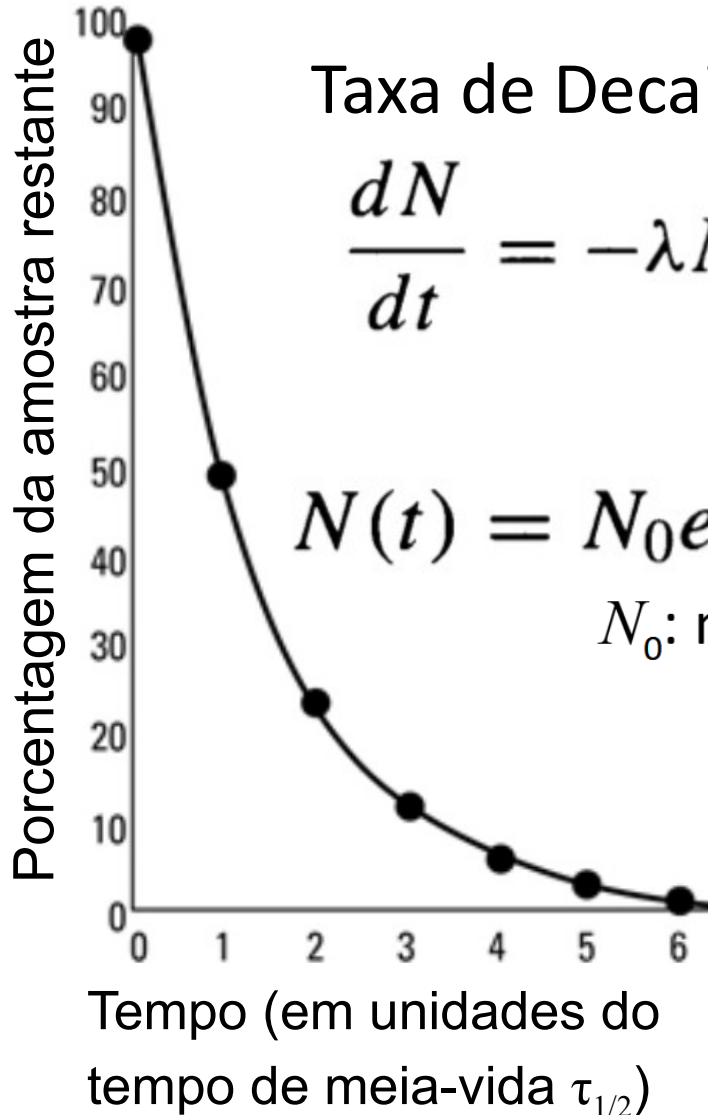
# De onde vem a água da Terra.

## Estudo UNESP/INPE:

- 35% planetesimais
- 60% de asteroides
- 5% cometas

Nota: diversos estudos sugerem frações diferentes, mas todos concordam em uma baixa contribuição por cometas (< 10%)

# Idade do Sistema Solar: medida pelo decaimento radioativo de meteoritos, os objetos mais antigos do sistema solar



Taxa de Decaimento radioativo:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

$N$ : número de átomos

$\lambda$ : constante de desintegração

$$\lambda = \frac{\ln 2}{\tau_{1/2}} \quad \tau_{1/2}: \text{tempo de meia-vida}$$

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

$N_0$ : número inicial de átomos na amostra

Alguns exemplos de meia-vida  $\tau_{1/2}$ :

Plutônio-239: 24 mil anos

Urânio-235: 704 milhões de anos

Urânio-238: 4,5 bilhões de anos

Th-232: 14 bilhões de anos

# Idade do Sistema Solar

Meteoritos:  $4567 \pm 1$  milhões de anos ( $4,567 \pm 0,001$  Gyr)

Júpiter: alguns milhões de anos depois

Terra:  $\sim 50$  milhões de anos depois

[Artigo na Nature Geoscience: 4,5682 Gyr](#)

Decaimento de urânio  
(U) em chumbo (Pb)

*Nature Geoscience* **3**, 637 - 641 (2010)

Published online: 22 August 2010 | doi:10.1038/ngeo941

Audrey Bouvier<sup>1</sup> & Meenakshi Wadhwa<sup>1</sup>

The age of the Solar System redefined  
by the oldest Pb–Pb age of a meteoritic  
inclusion

[Connelly et al. \(2017\):](#)

$4,5673 \pm 0,0002$  Gyr

[Pb–Pb chronometry and the early  
Solar System](#)



Chondrite meteorite with calcium–aluminium-rich inclusions seen as white specks. From the collection of the American Museum of Natural History.

# Museu de Geociências






## Meteorito Itapuranga



O meteorito Itapuranga foi encontrado em 1977, na Fazenda Curral de Pedra, a 18 Km da cidade de Itapuranga, Estado de Goiás, Brasil. Entre os meteoritos metálicos o Itapuranga é o 3º maior encontrado no Brasil, com 628 Kg. Sua idade estimada é de 4,5 bilhões de anos, a mesma idade do nosso planeta! Pertence à classe dos meteoritos metálicos (sideritos), com alto teor de liga de ferro-níquel.

## Coleção de Meteoritos

Miniatura	Título	Coleção	Doador
	Odessa		
	Santo Antônio do Descoberto	Araújo Ferraz	BRAMON   José Melo Ribeiro Alcântara
	Siderito		Araújo Ferraz