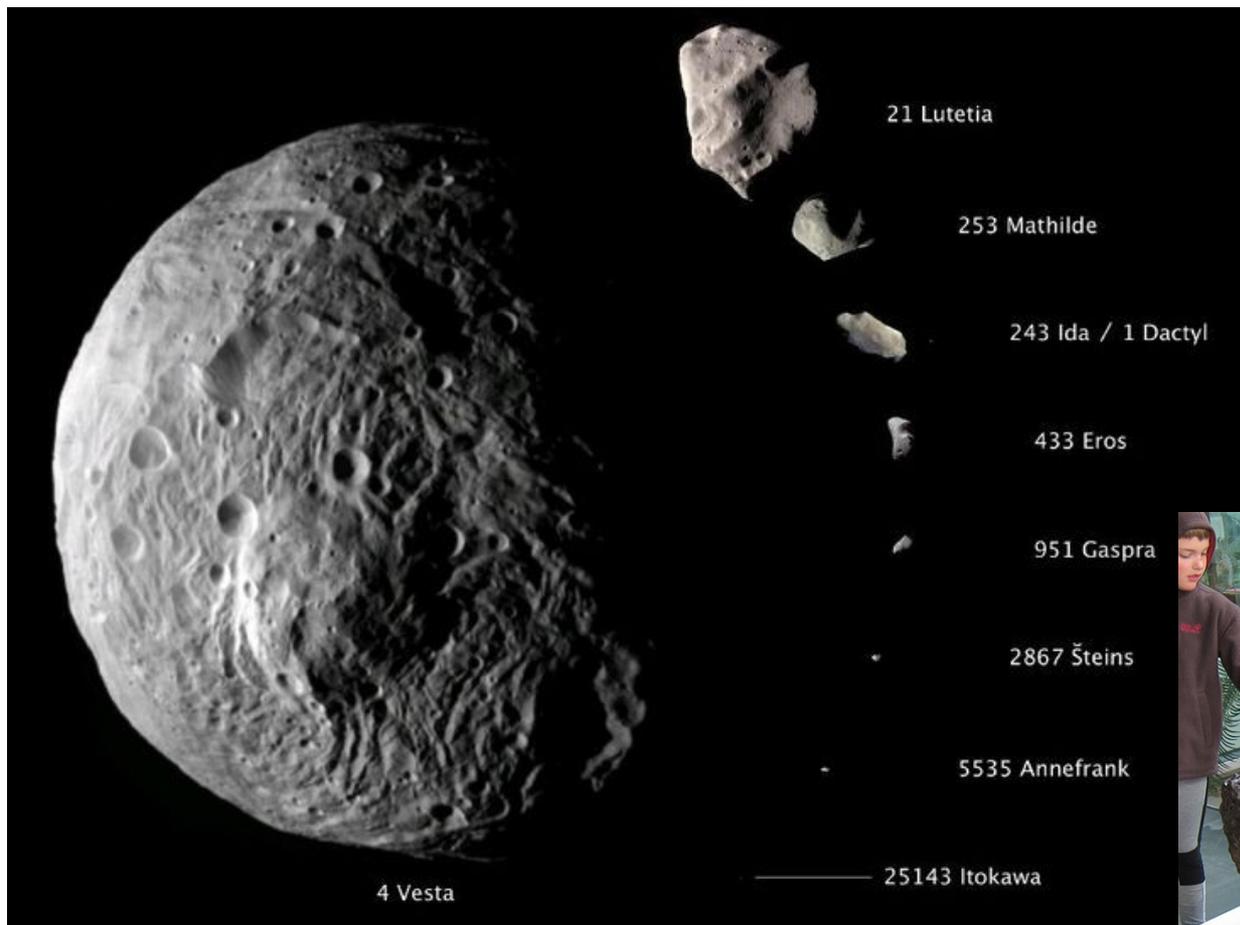


10. Asteroides e Meteoritos



Asteroides

Meteoritos

Relação de Titus-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

Após a descoberta acidental de Urano, que se encaixou na relação de Titus-Bode, foi procurado um possível 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	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.

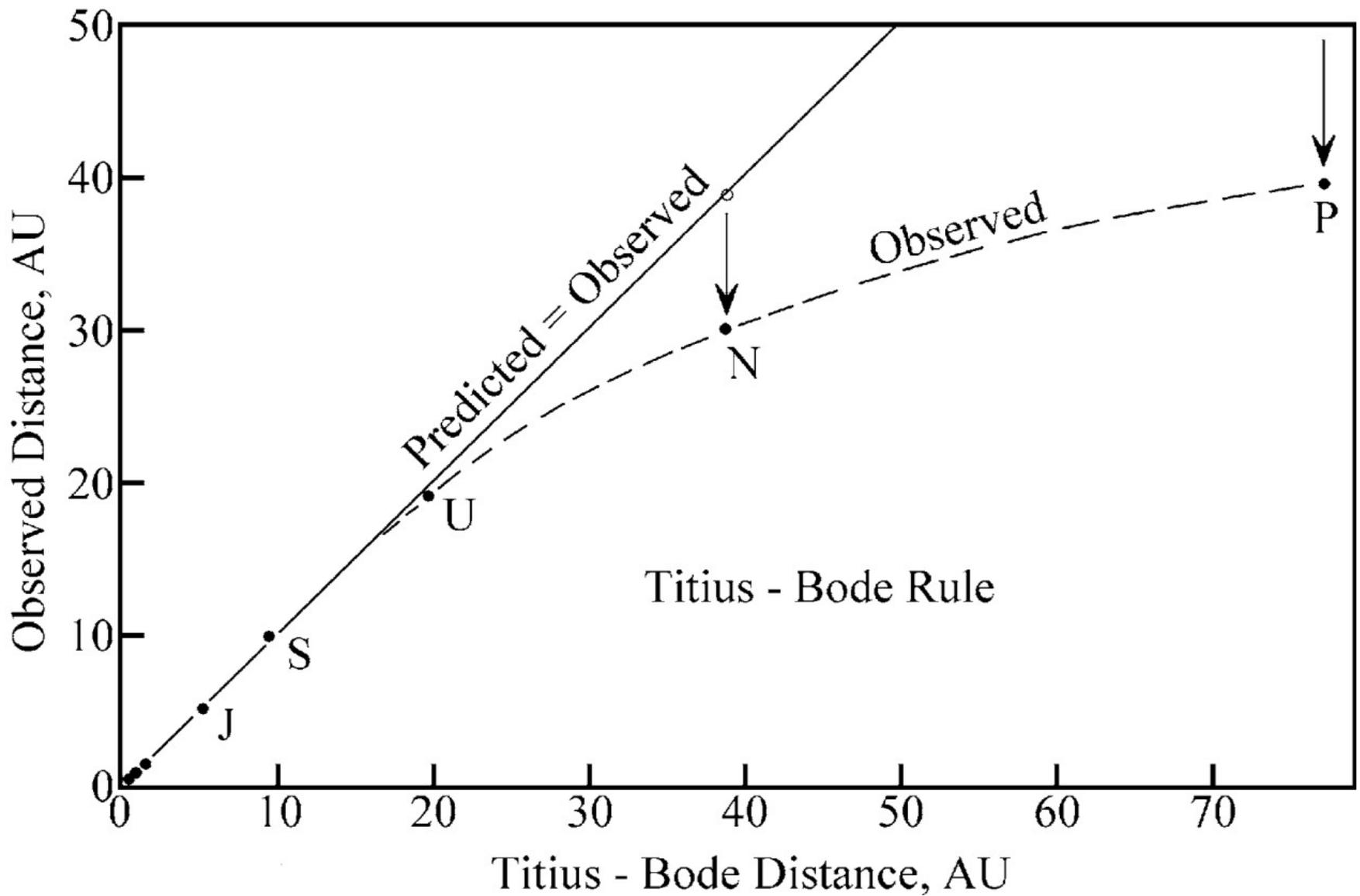


Figure 3.2. The observed radii of the orbits of the terrestrial planets (Mercury, Venus, Earth, Mars, and Ceres) as well as those of Jupiter and Saturn agree with the distances predicted by the Titius-Bode rule. However, the observed average radii of the orbits of Uranus, Neptune, and of the dwarf planet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

Progressão exponencial na descoberta de asteroides

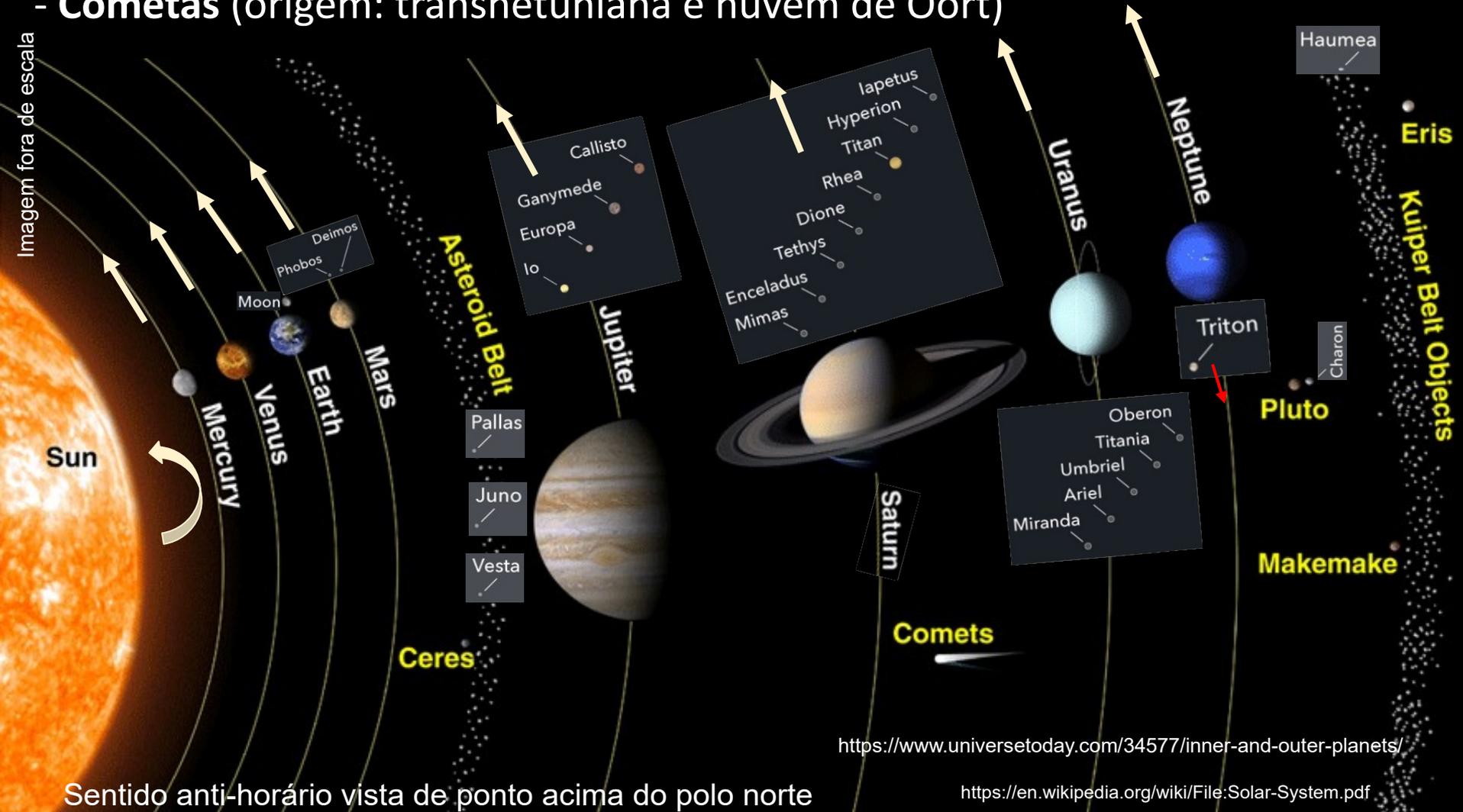
- 10 em 1849
 - 1 Ceres – 1801
 - 2 Pallas – 1802
 - 3 Juno – 1804
 - 4 Vesta – 1807
 - 5 Astraea – 1845
 - 6 Hebe – julho de 1847
 - 7 Iris – agosto de 1847
 - 8 Flora – outubro de 1847
 - 9 Metis – 25 de abril de 1848
 - 10 Hygiea – 12 de abril de 1849 *décimo asteroide descoberto*
- 100 asteroides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

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”

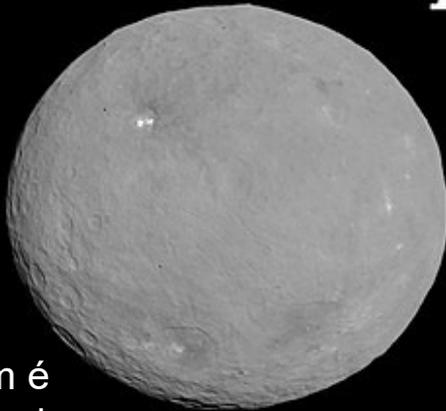
Pequenos corpos do sistema solar:

- **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)

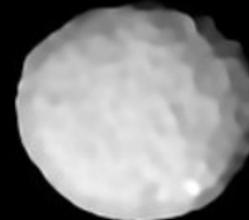
Ceres

939 km



Vesta

525 km



Pallas

512 km



Hygiea

434 km

Vesta
 $572,6 \times 557,2 \times 446,4$ km
Mean diameter: 525 km



4 Vesta



21 Lutetia



253 Mathilde



243 Ida

(243) Ida 1 Dactyl



433 Eros



951 Gaspra

2867 Šteins



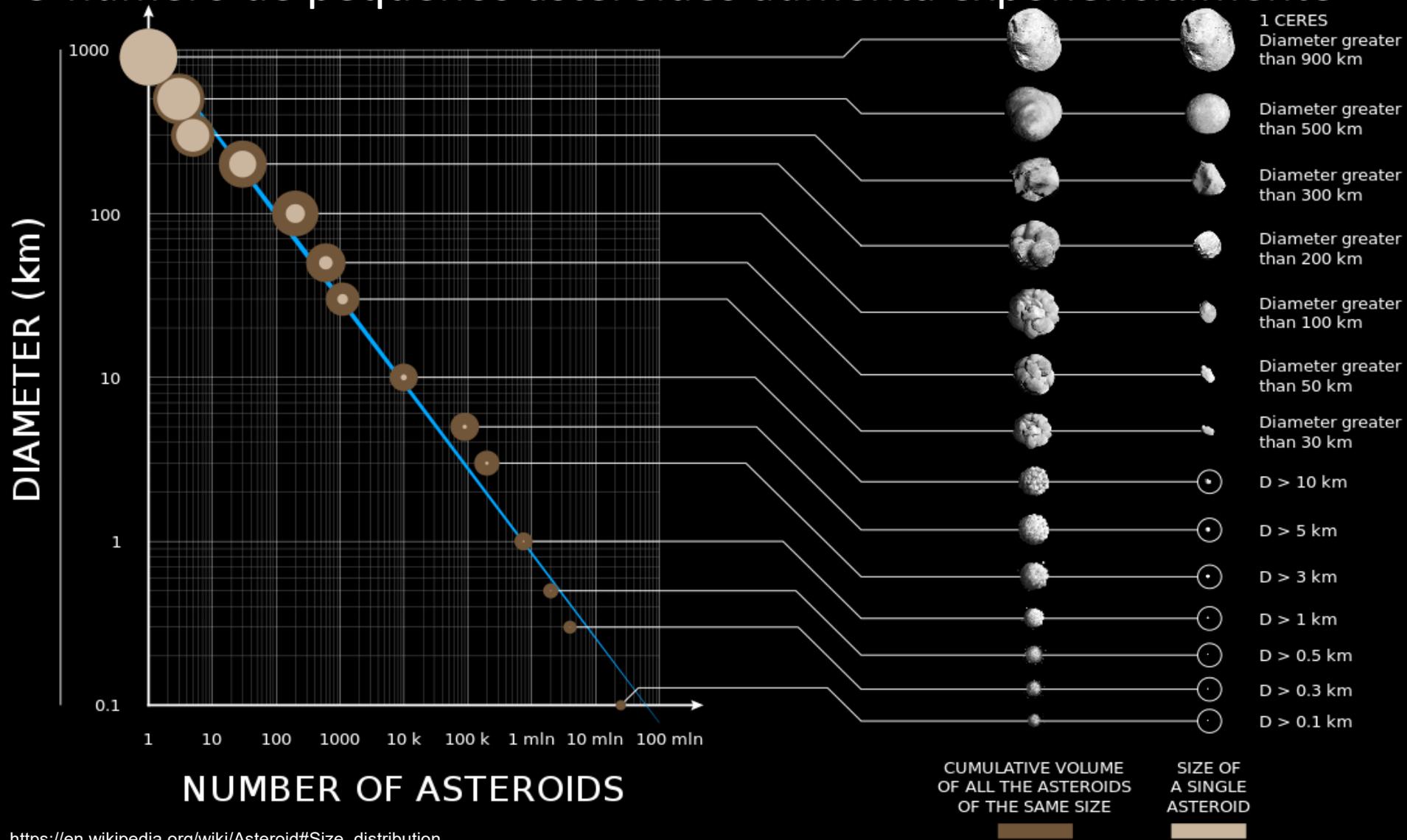
25143 Itokawa



433 Eros

13 x 13 x 33 km

O numero de pequenos asteroides aumenta exponencialmente



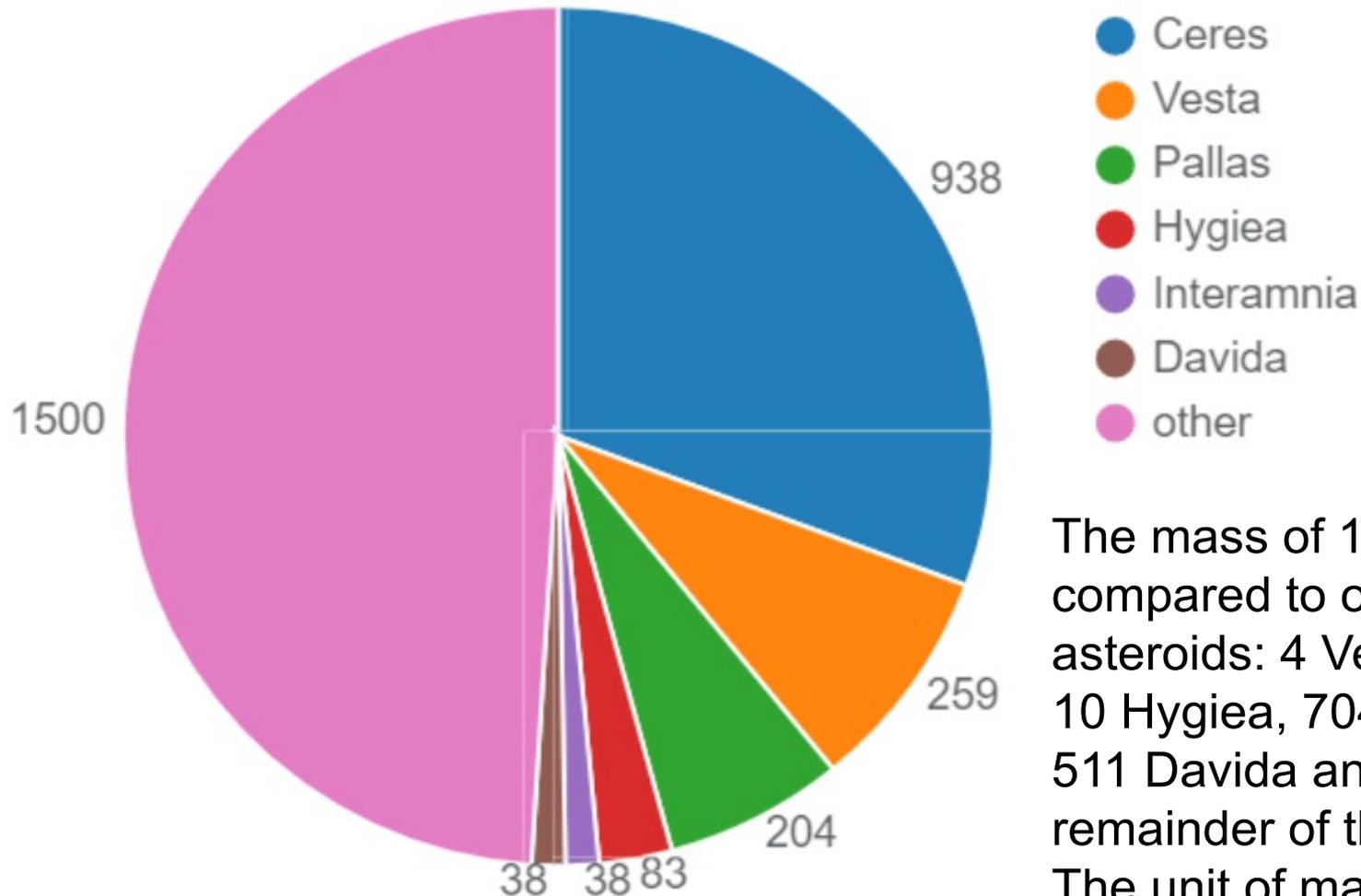
https://en.wikipedia.org/wiki/Asteroid#Size_distribution

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

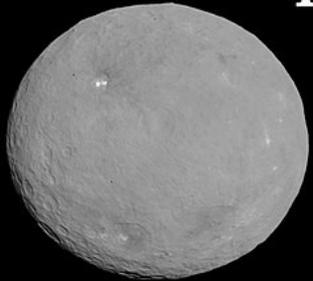


The mass of 1 Ceres compared to other large asteroids: 4 Vesta, 2 Pallas, 10 Hygiea, 704 Interamnia, 511 Davida and the remainder of the Main Belt. The unit of mass is $\times 10^{18}$ kg.

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

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

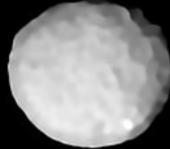
The four largest asteroids



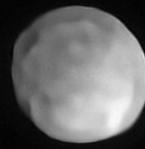
Ceres
939 km



Vesta
525 km



Pallas
512 km



Hygiea
434 km



21 Lutetia
121 x 100 x 75 km



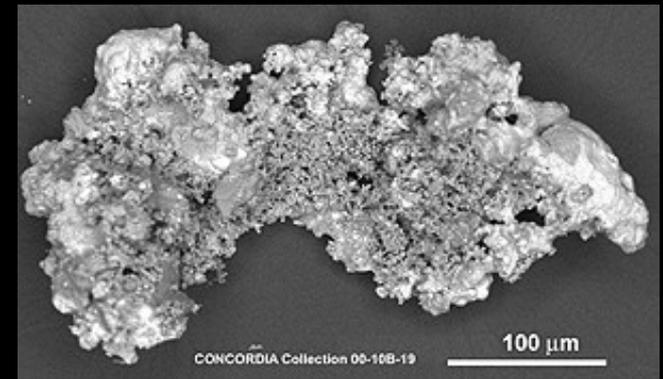
433 Eros
13 x 13 x 33 km

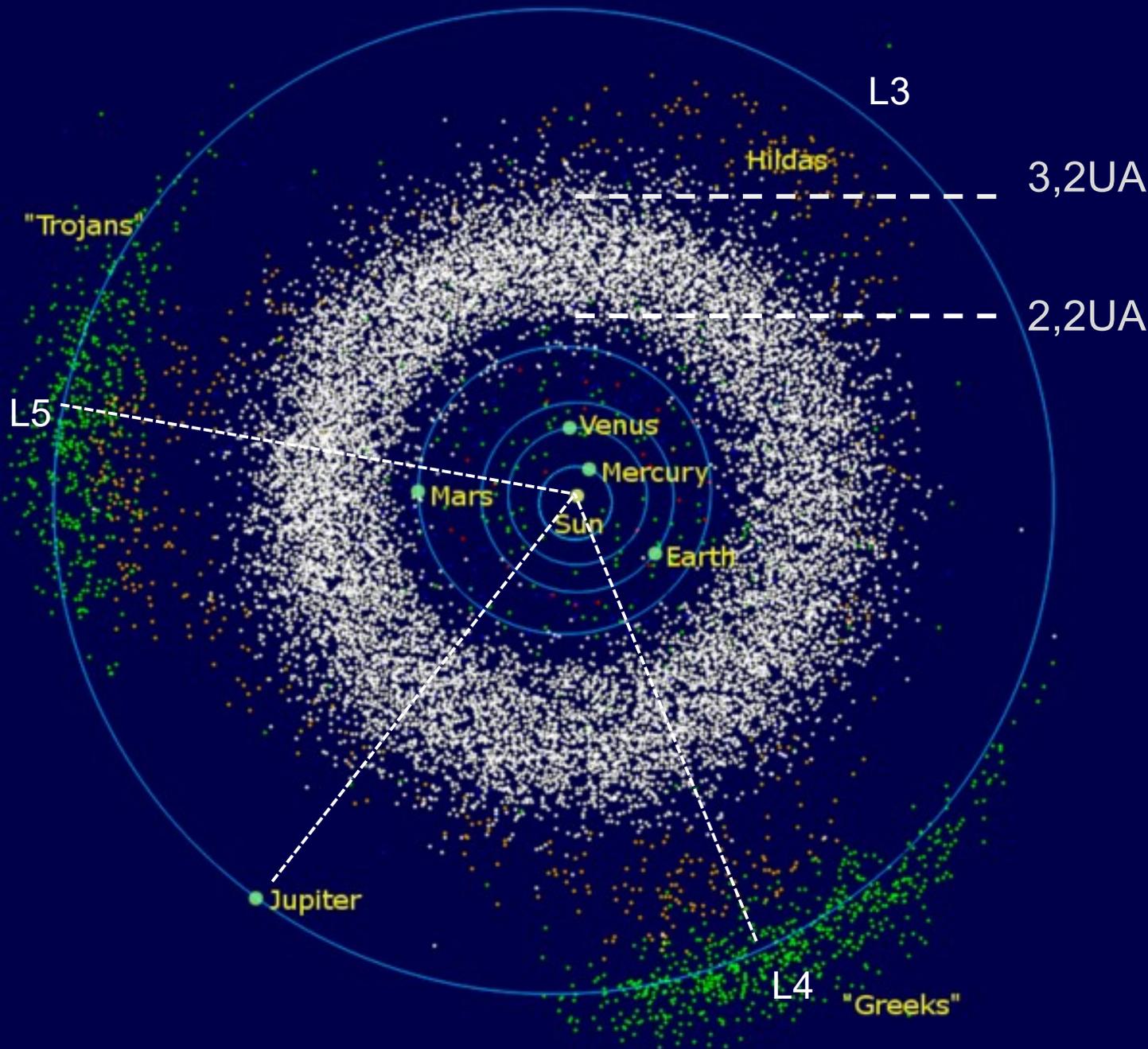
O tamanho mínimo não está bem definido, mas é adoptado $\sim 1\text{m}$

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.

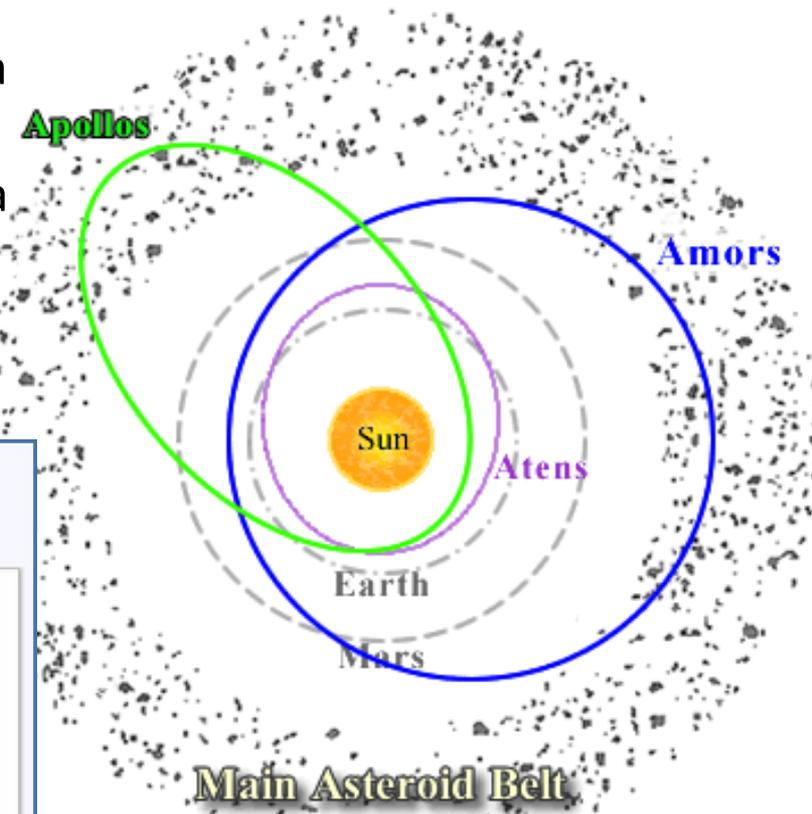
Órbita da Terra: periélio = 0,983 UA, afélio = 1,017 UA

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

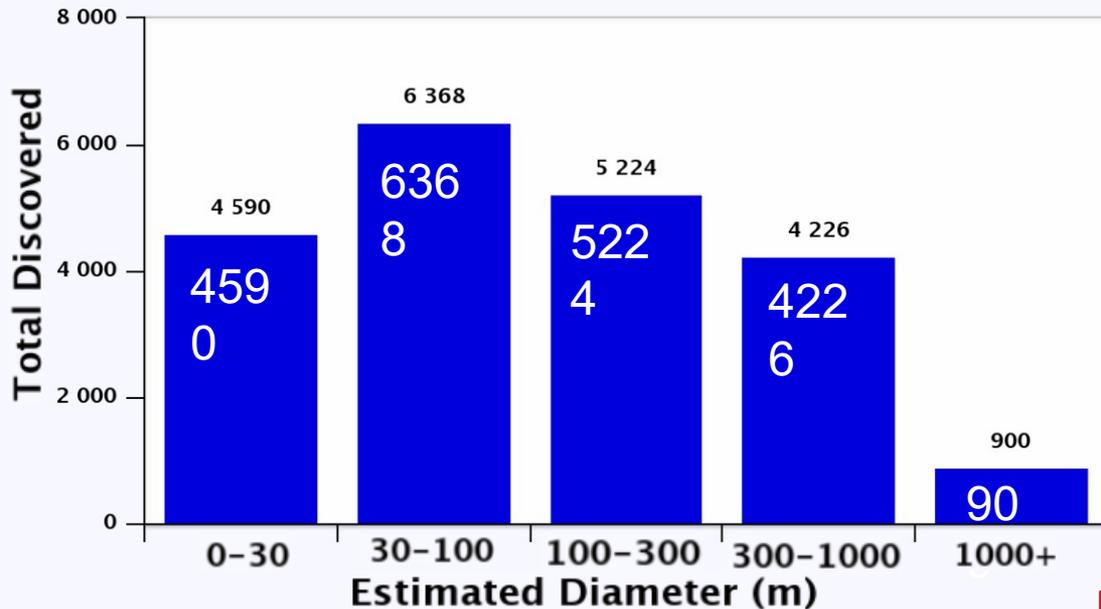
Apollos: semi-eixo maior $>$ 1 UA e cruzam a órbita da Terra. $a >$ 1 UA e periélio $q <$ 1.017 AU

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)

Fora	Dentro
■ Apollos: 15,142 (55.4%)	■ Atiras/Apohele: 26 (0.1%)
■ Amors: 9,963 (36.4%)	
■ Atens: 2,107 (7.7%)	
■ Comets: 117 (0.4%)	

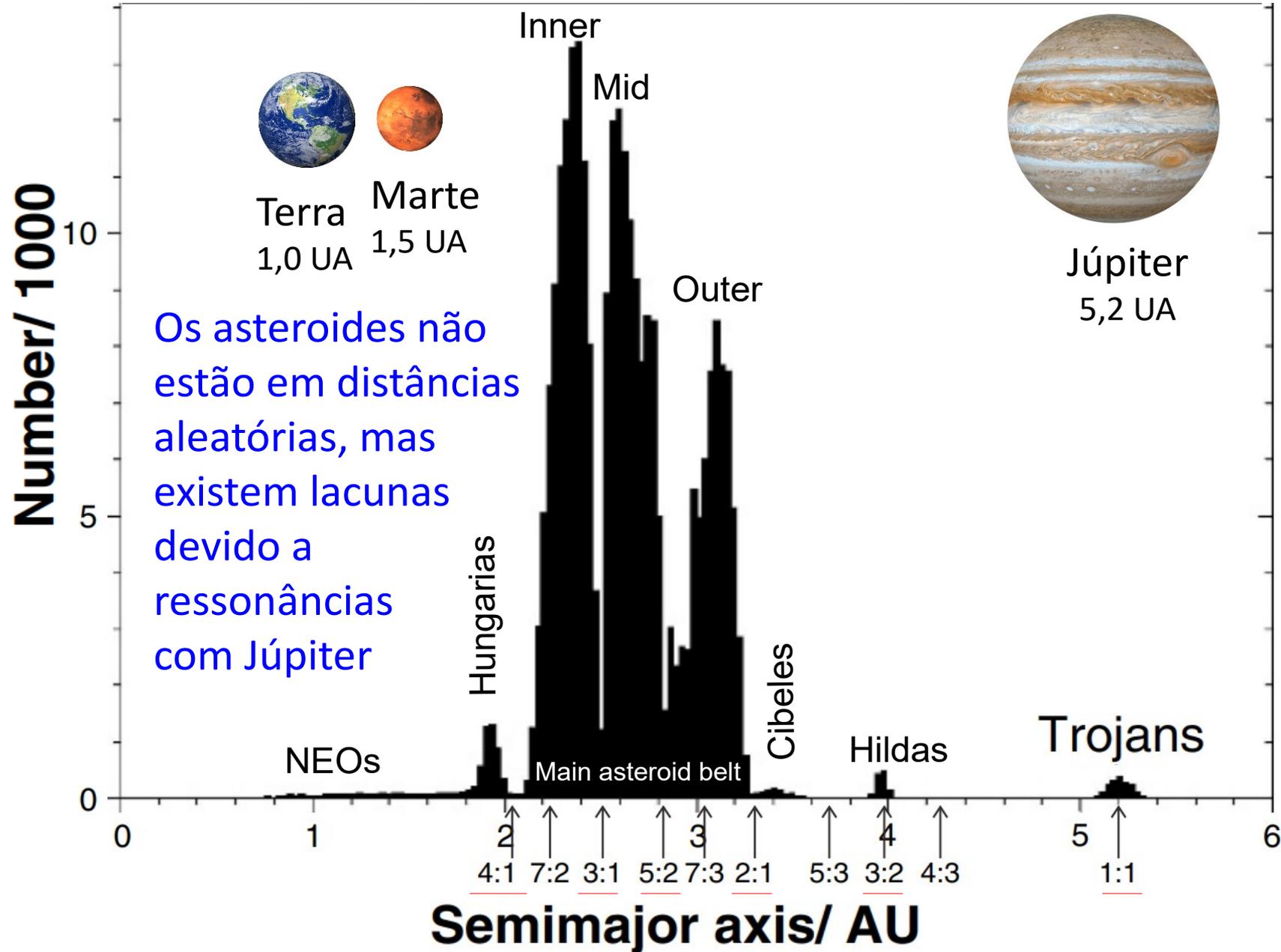
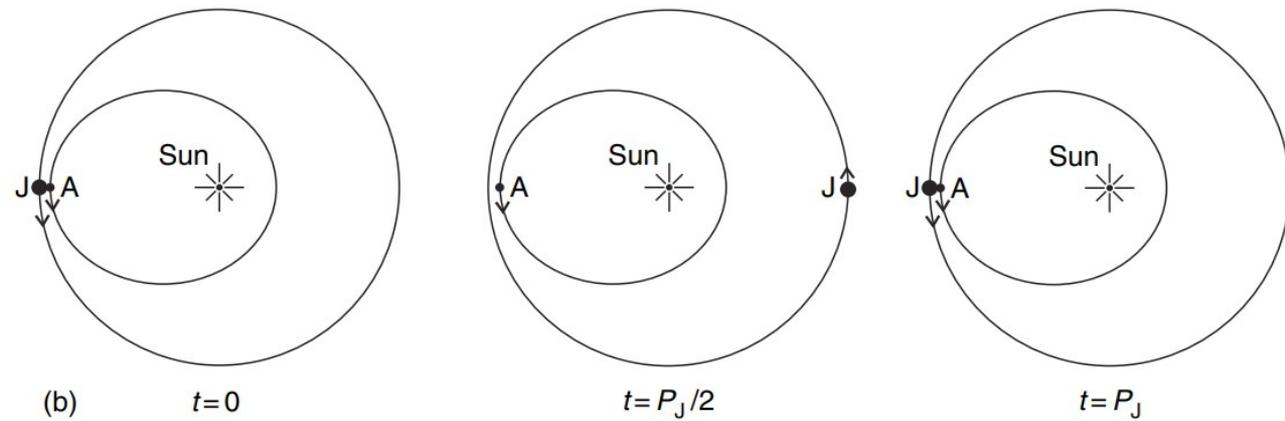
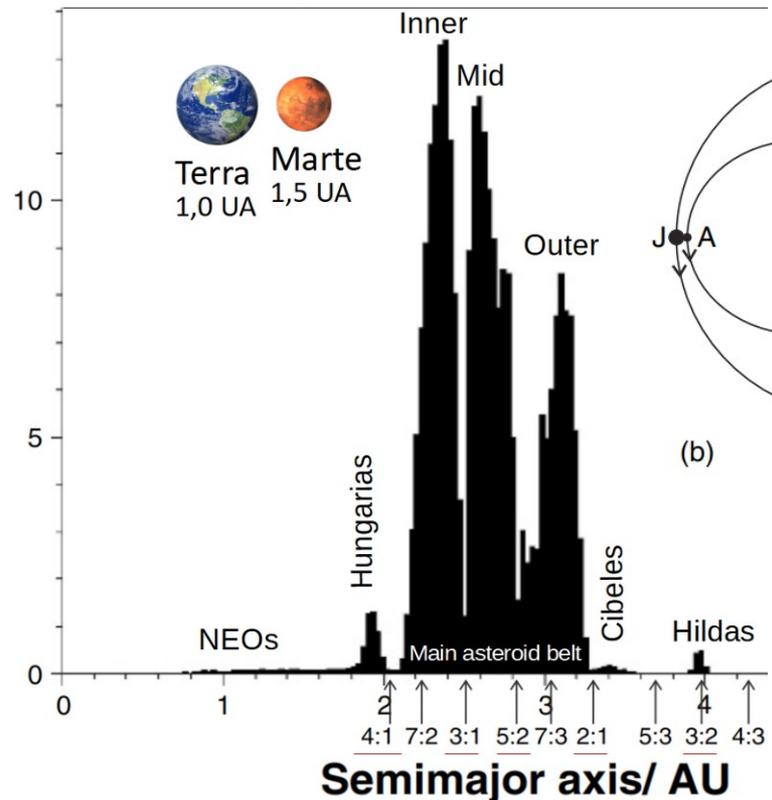
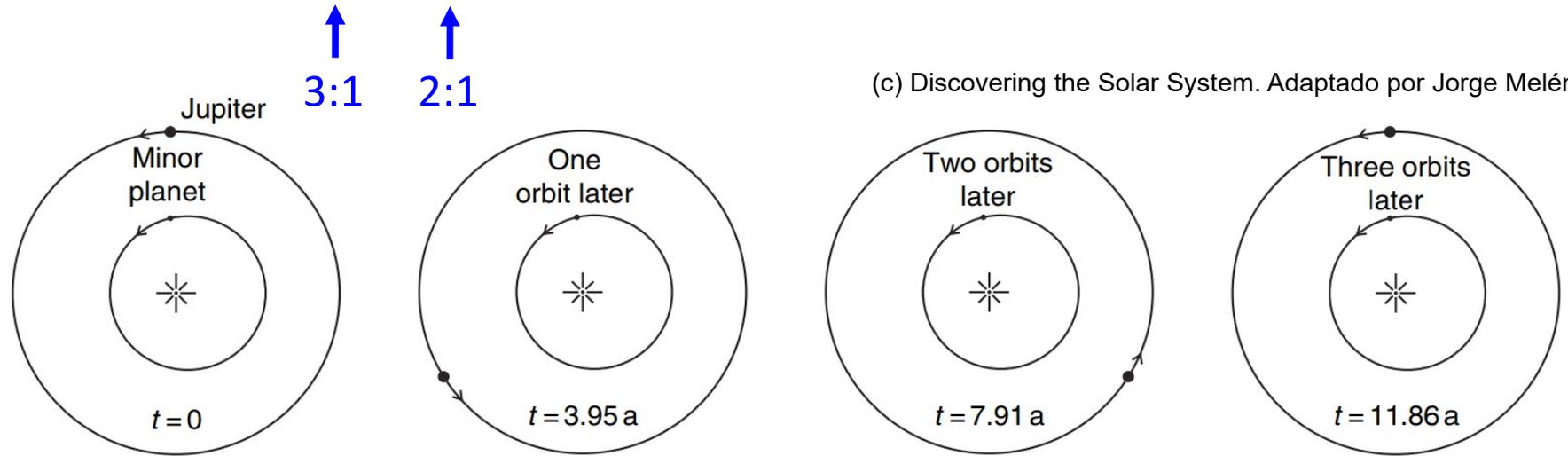


Figure 3.1 The distribution of the semimajor axes of the orbits of the asteroids in October 2006. (Adapted from data available at the Minor Planet Center) (c) Discovering the Solar System. Adaptado por Jorge Meléndez



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).

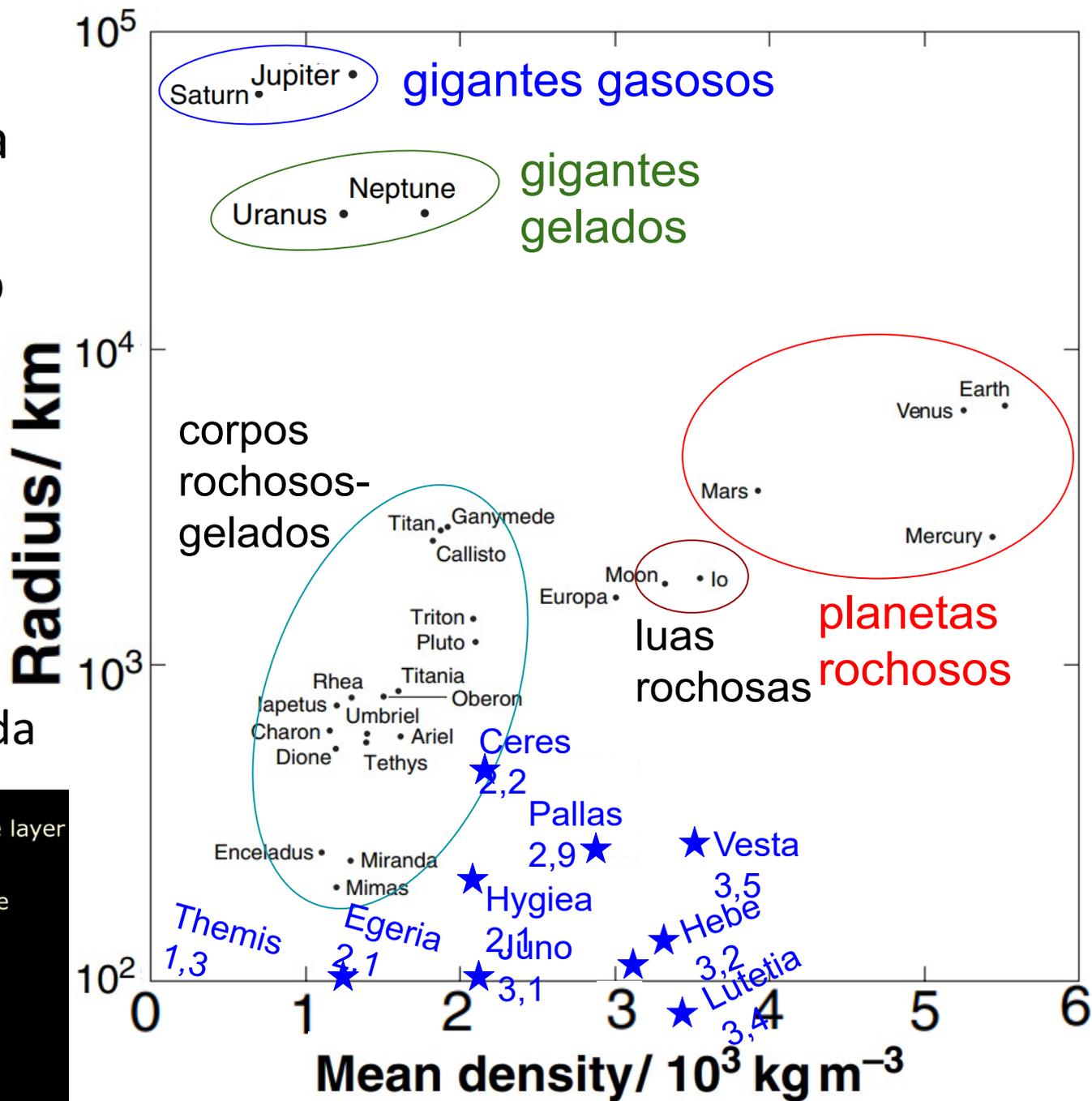
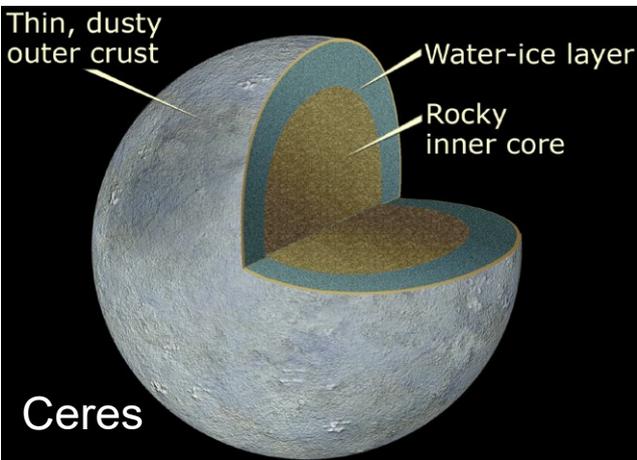


(c) Discovering the Solar System. Adaptado por Jorge Meléndez

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

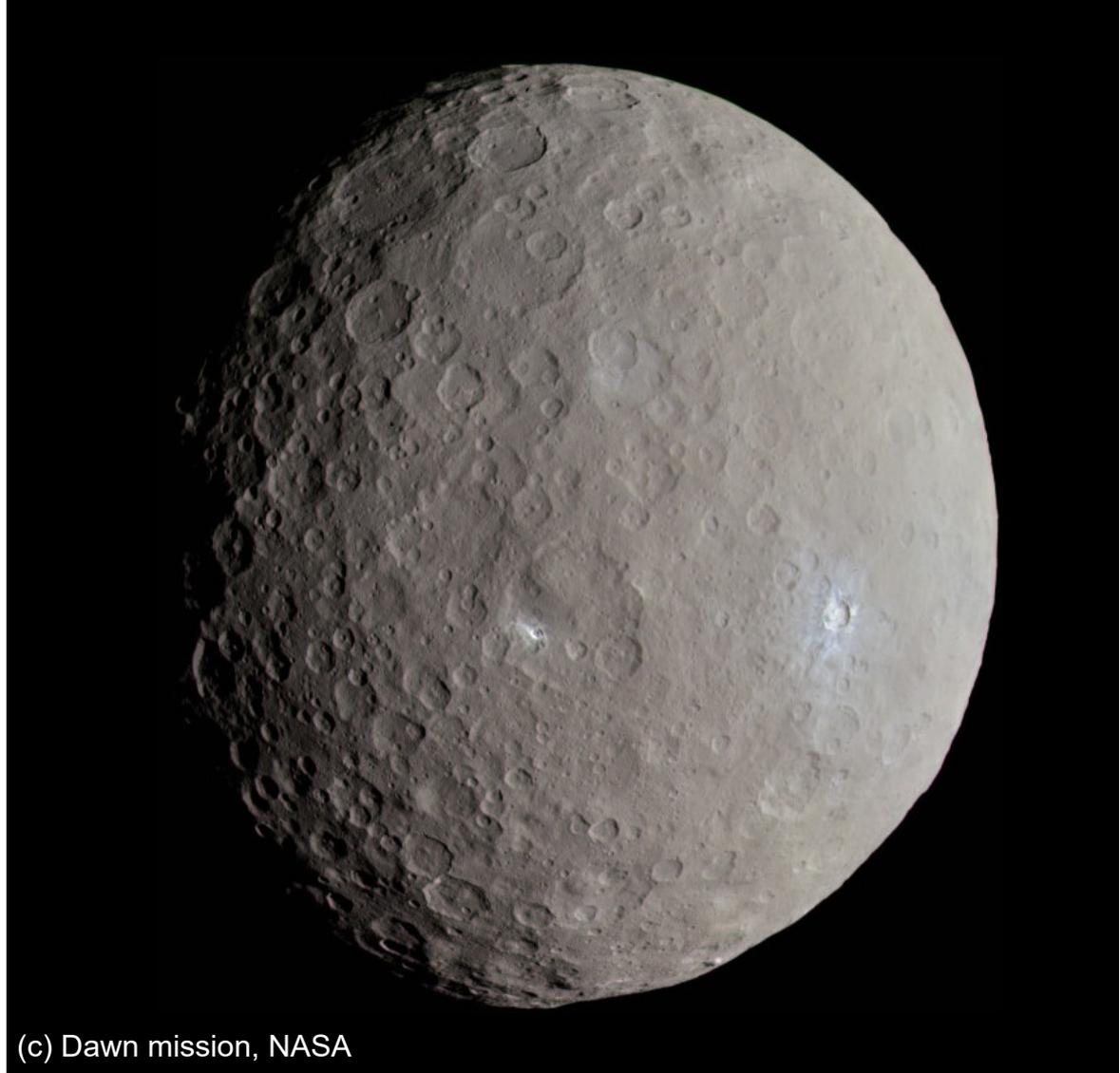
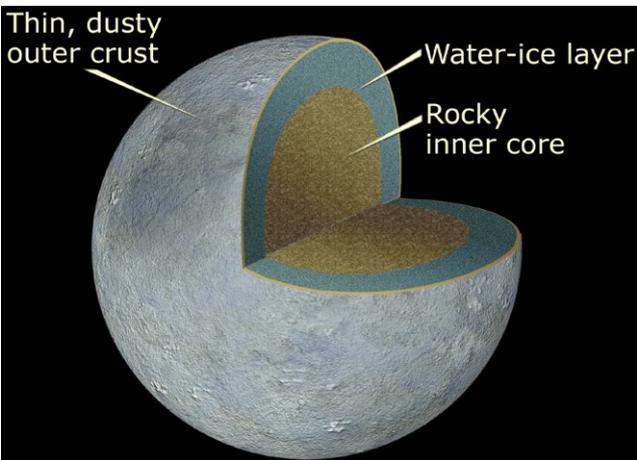


Asteroide 1 Ceres

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

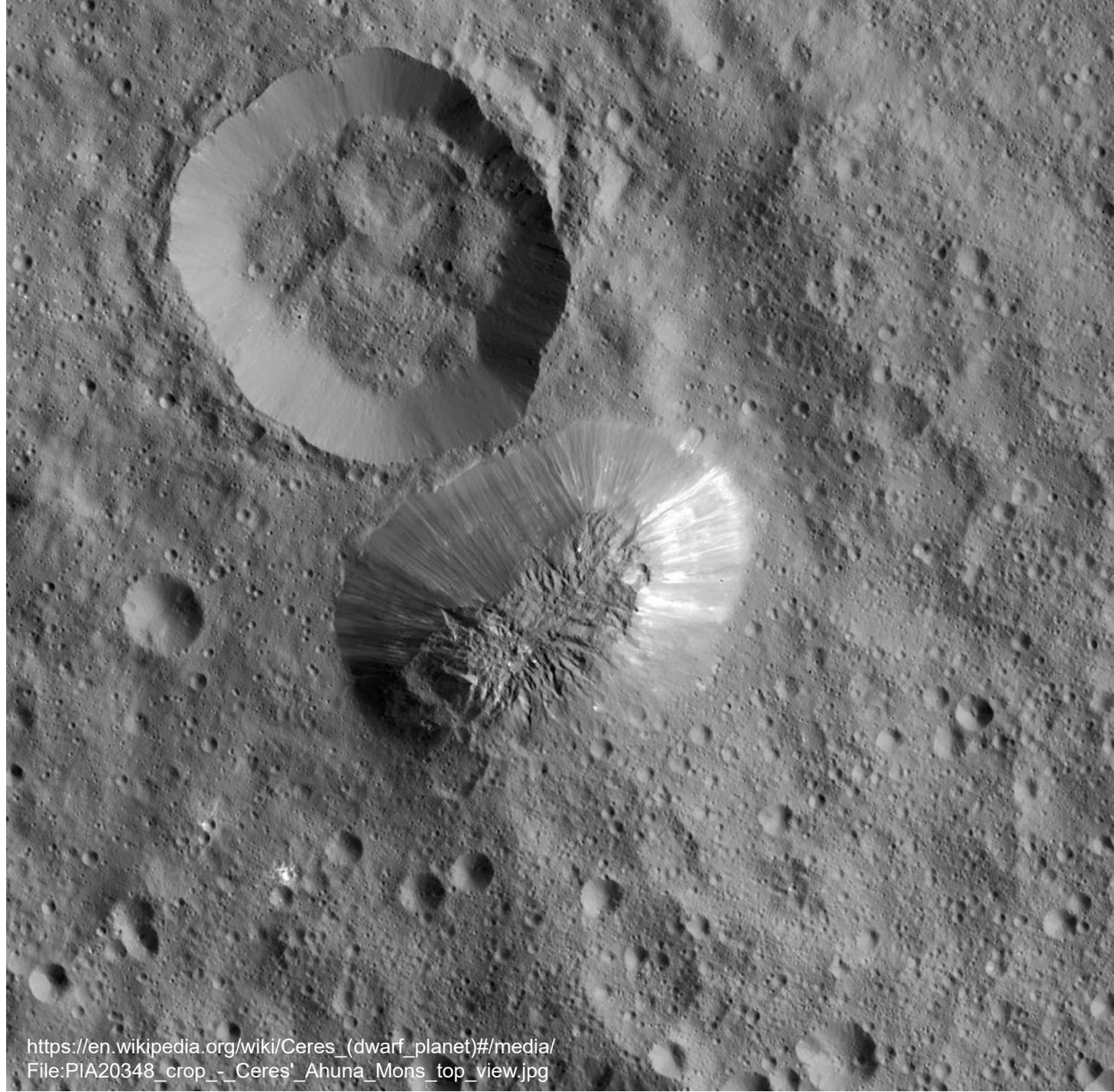


$$\rho = 2,2 \text{ g/cm}^3$$

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

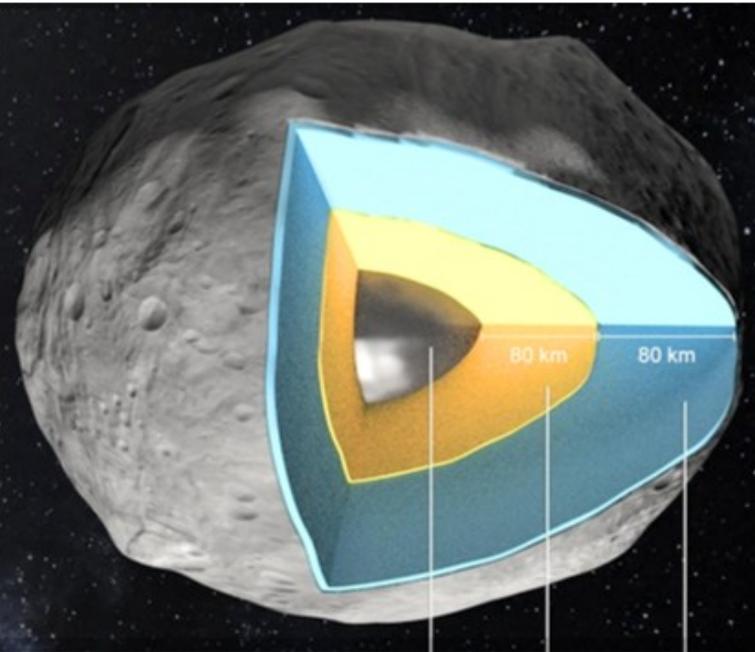
Ahuna Mons:
criovulcão em
Ceres?

Altura = 5 km



Asteroide 4 Vesta, $573 \times 557 \times 446$ km, $\rho = 3,5$ g/cm³

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

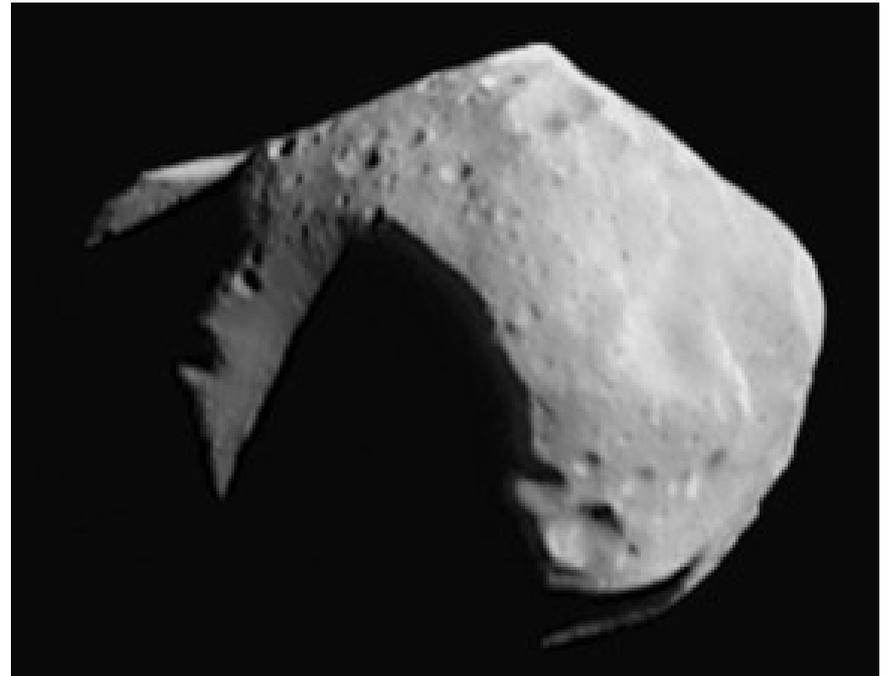
Asteroide 951 Gaspra não apresenta grandes crateras (como por ex. Mathilde) → talvez é o resto de uma colisão que aconteceu “recentemente” (há 20 – 300 milhões de anos)

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

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

Uma teoria é que ondas de choque sísmicas se propagam através do asteroide, transformando crateras menores em escombros.

https://en.wikipedia.org/wiki/433_Eros



(c) NEAR Shoemaker mission, 1998-2001

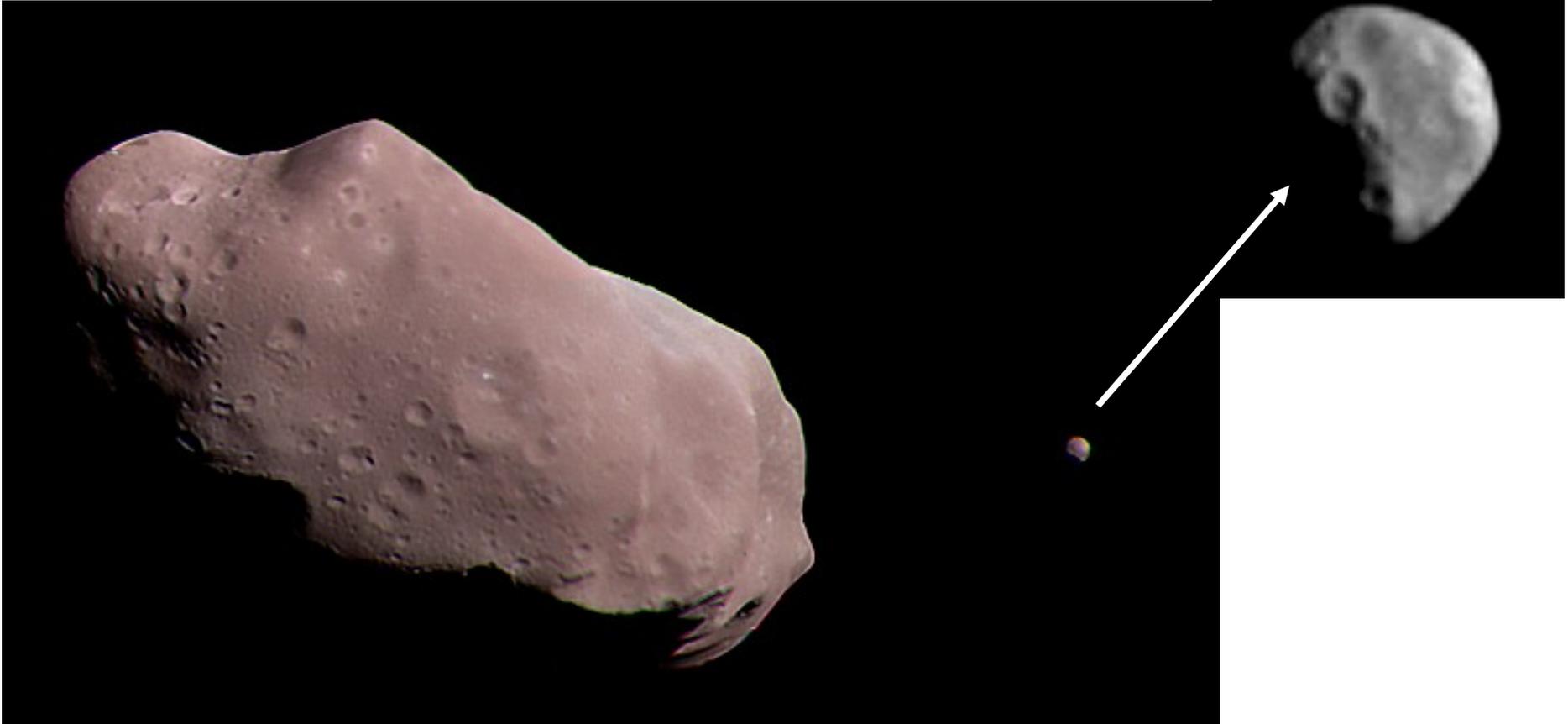
Asteroide 243 Ida tem uma pequena lua!

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.

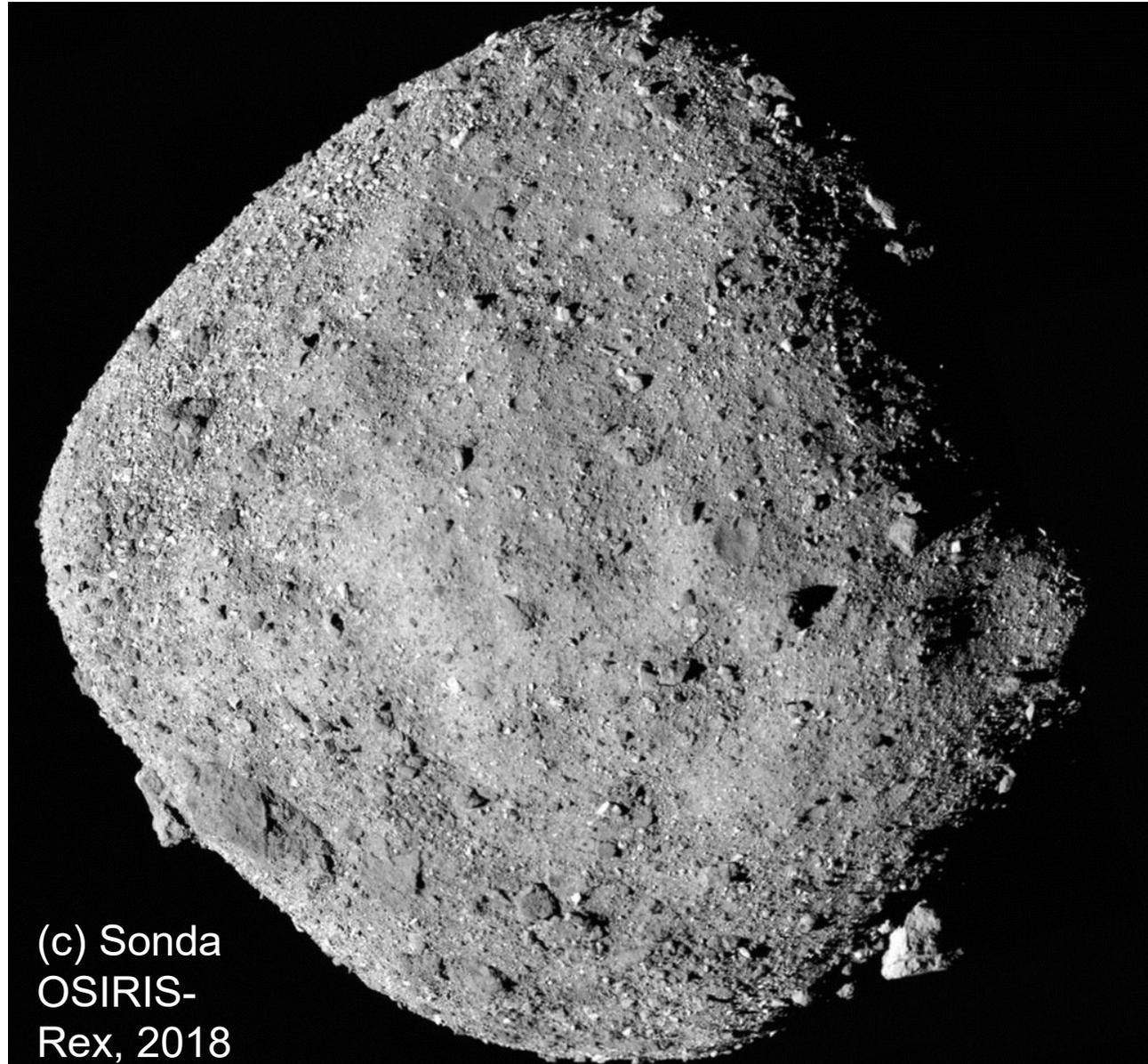
(c) NASA/JPL/Processed by Kevin M. Gill

https://en.wikipedia.org/wiki/243_Ida

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

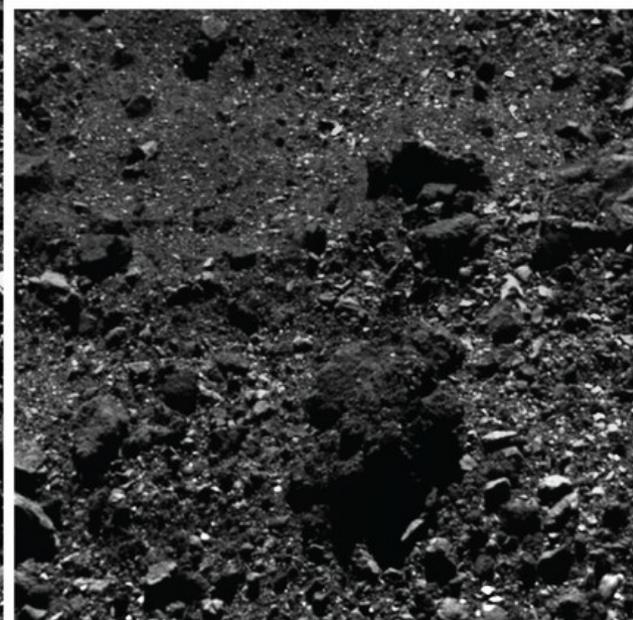
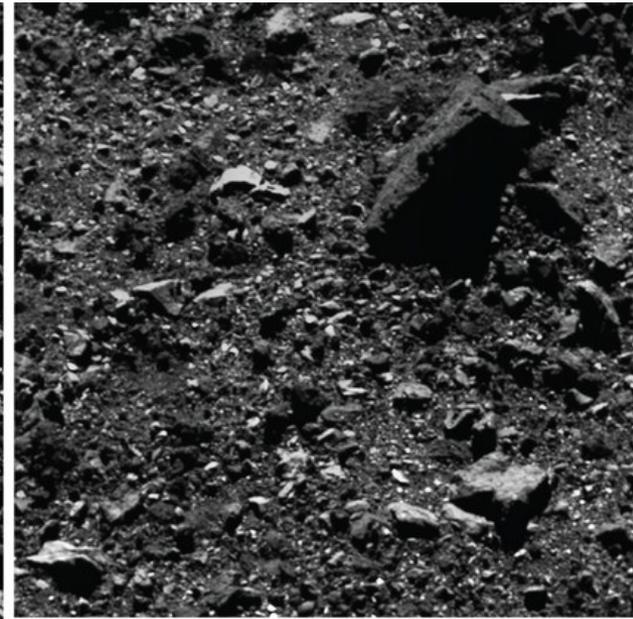
Pequena chance
(1/2000) de
impacto com a
Terra ao redor do
ano 2182

A baixa densidade
(1,2 g/cm³) 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.



(c) Sonda OSIRIS-Rex

Coleta de amostra do asteroide Bennu pela OSIRIS-Rex em 2019.

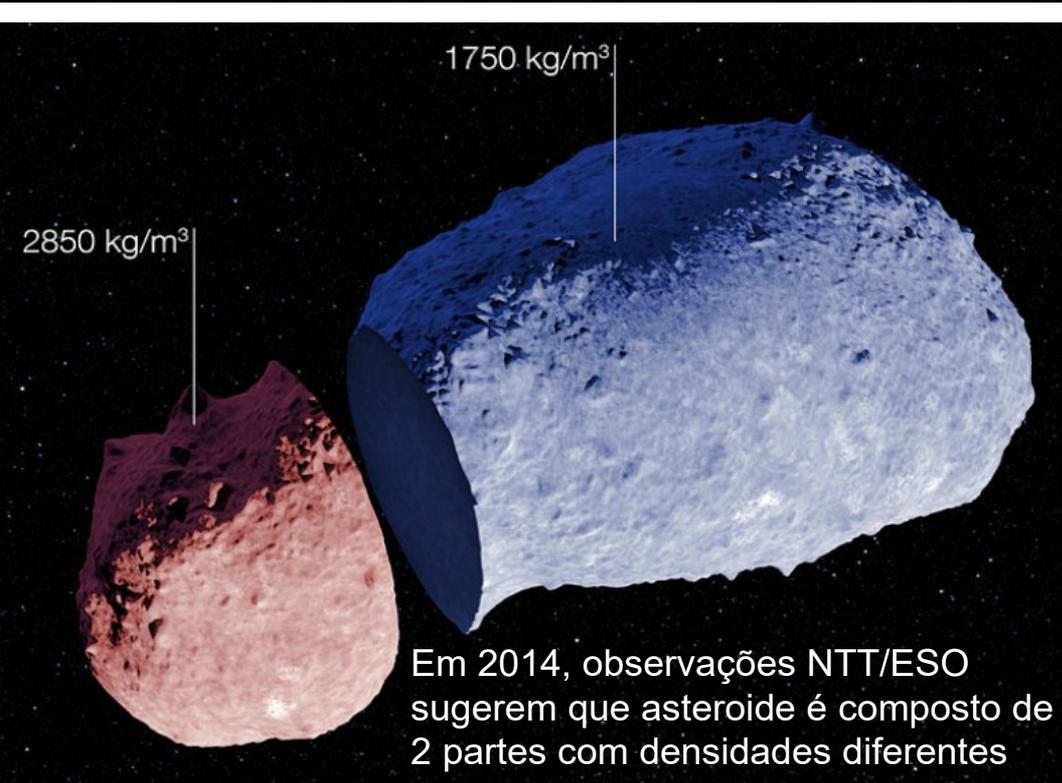
A missão deve retornar a amostra para a Terra em 9/2023



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

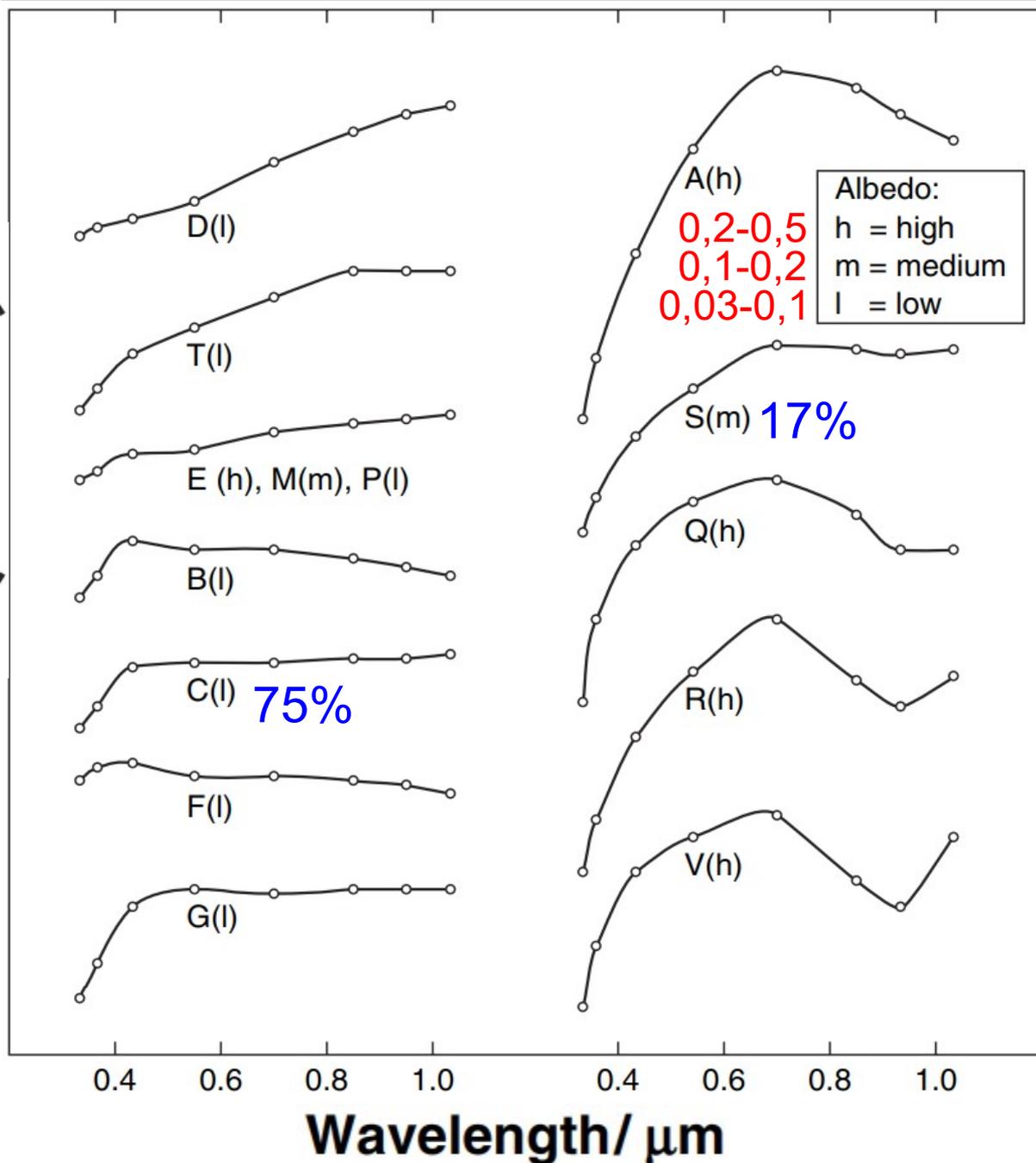
M: metálicos

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)

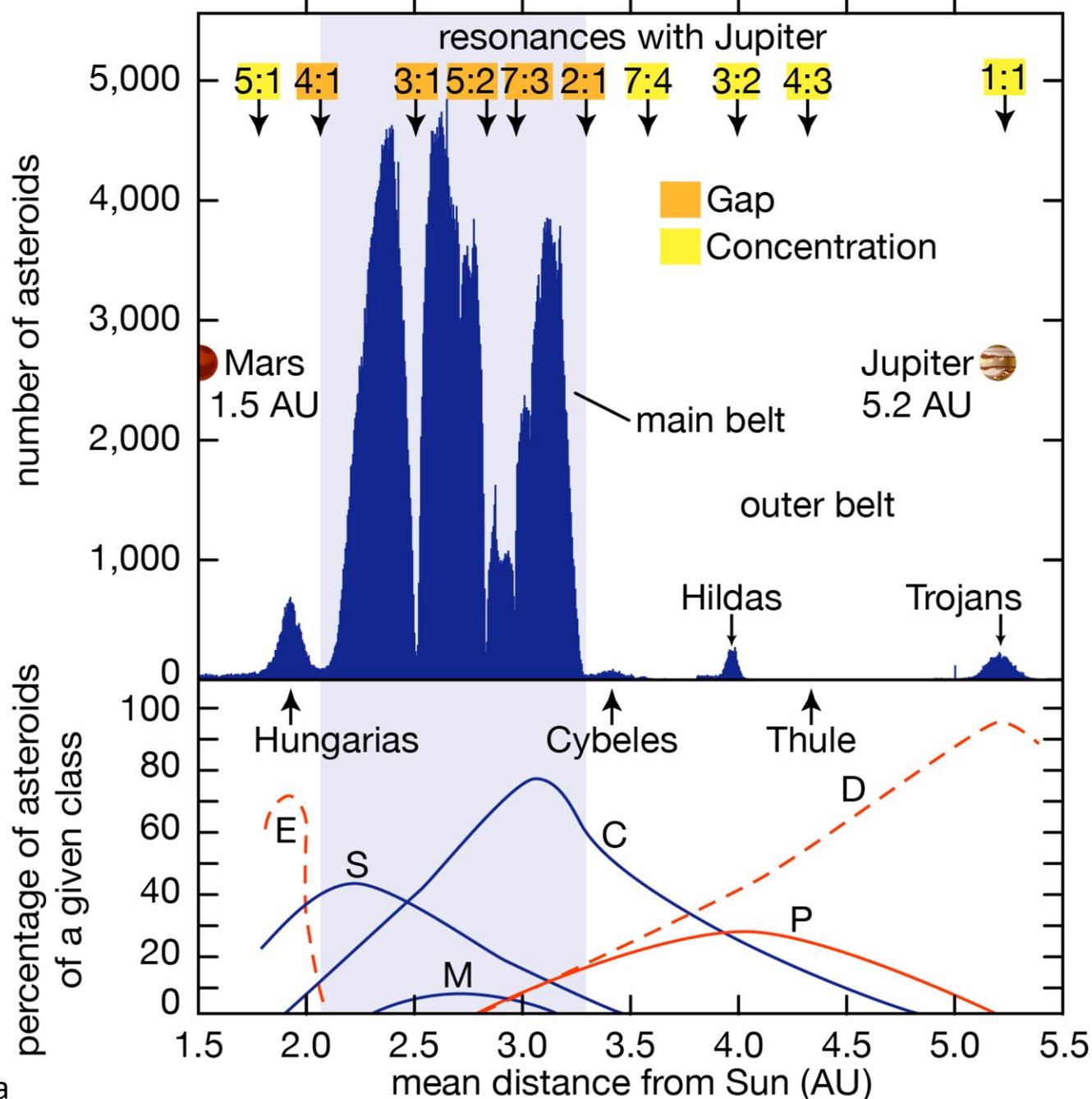
Classe M: metálico (ferro e um pouco de Ni), com pouco ou nenhum silicato.

log
Spectral reflectance
2X



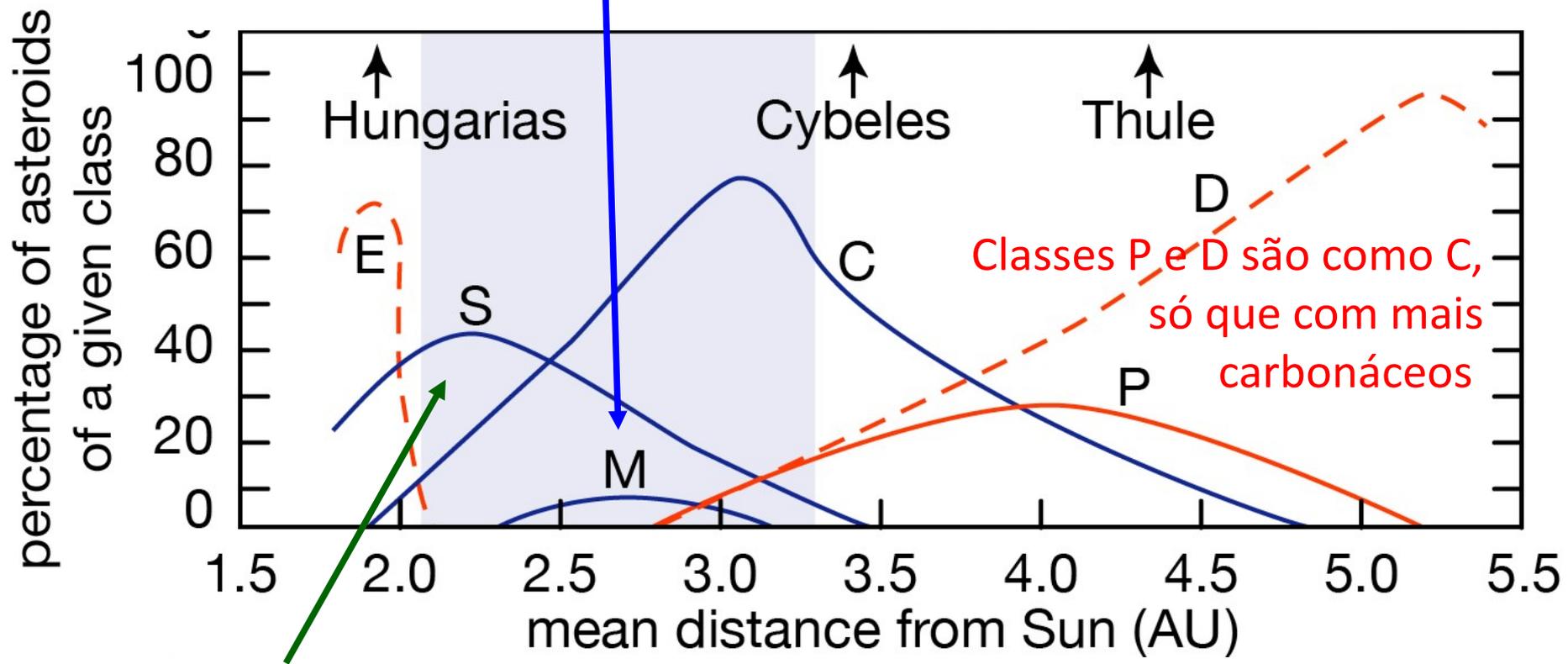
Distribuição por tipo espectral.

- 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

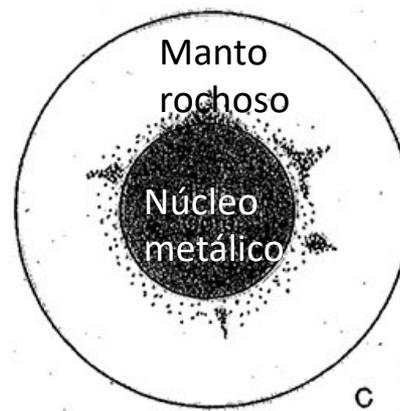


Uma fração importante dos asteroides de tipo S, que tem silicatos e metais, podem vir também de asteroides diferenciados, da interface entre o manto e o núcleo

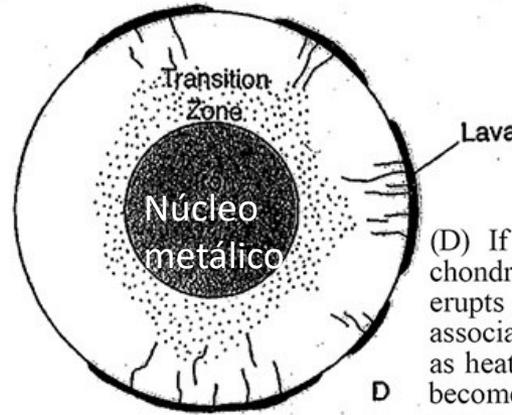
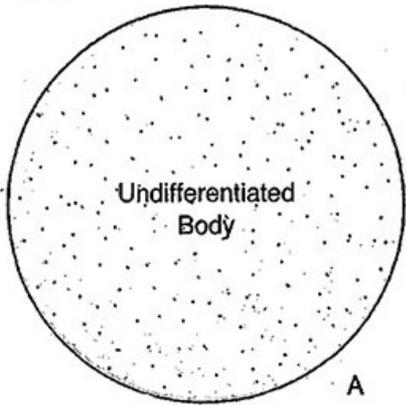
Corpo não diferenciado

Corpo diferenciado (diâmetro > 200 km)

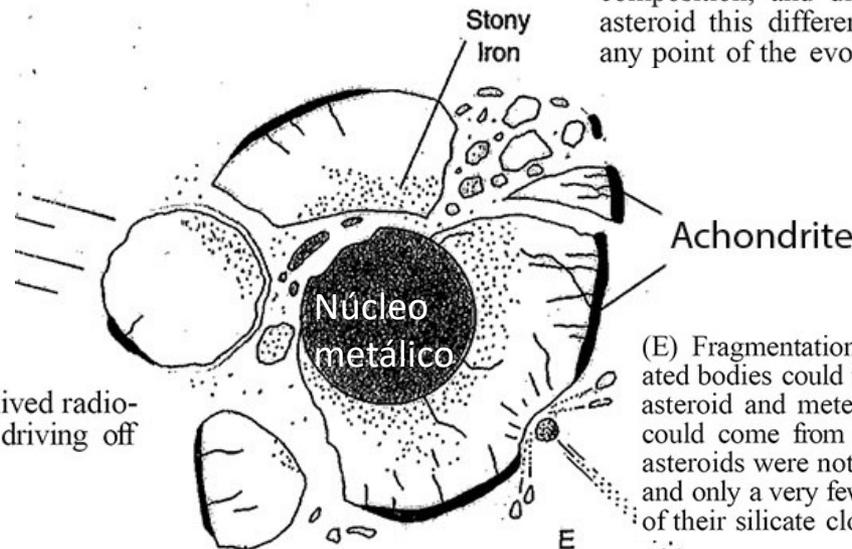
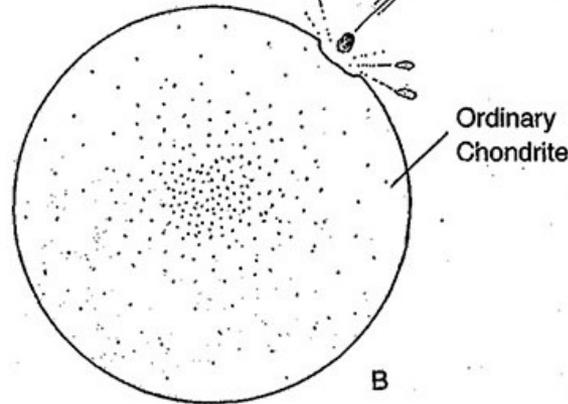
(A) An original body of primitive composition (carbonaceous, outer belt; ordinary, inner belt) forms by accretion.



(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.



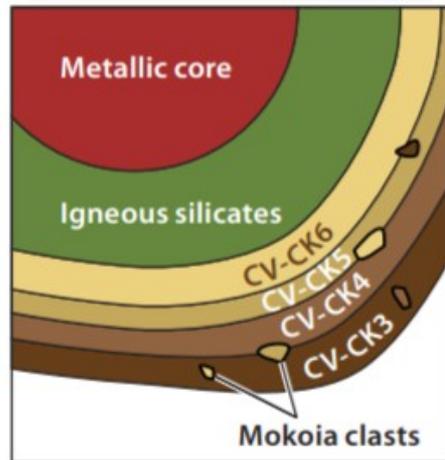
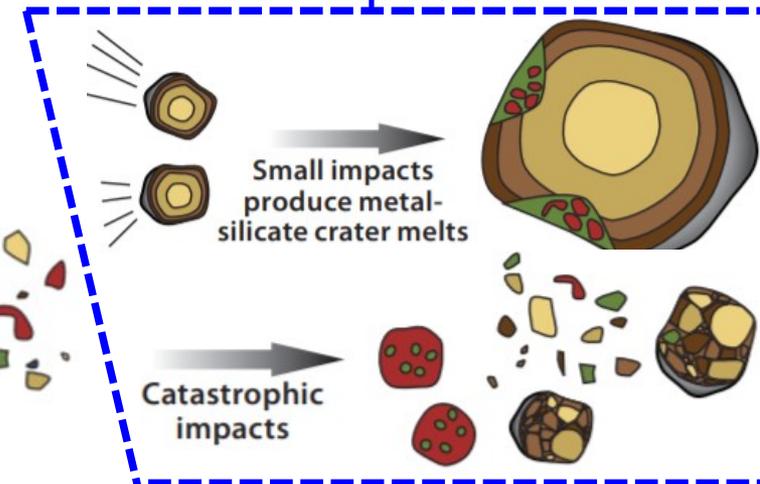
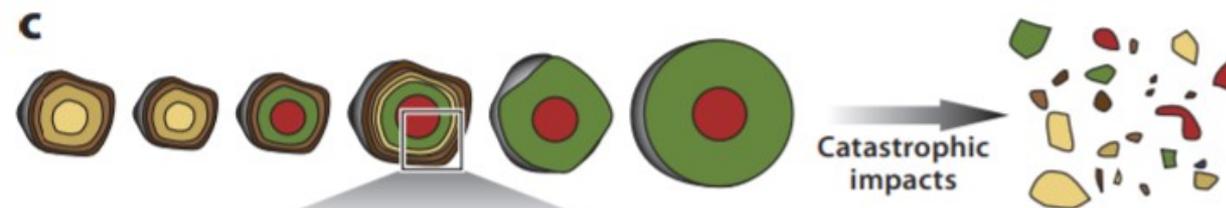
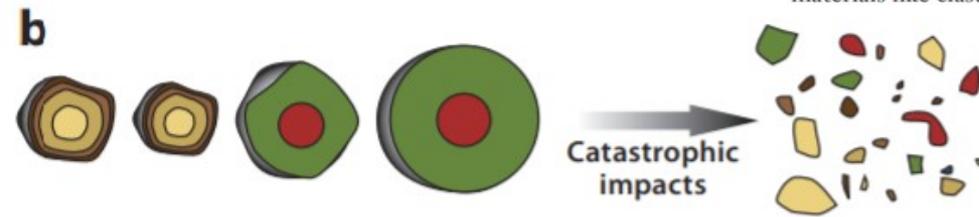
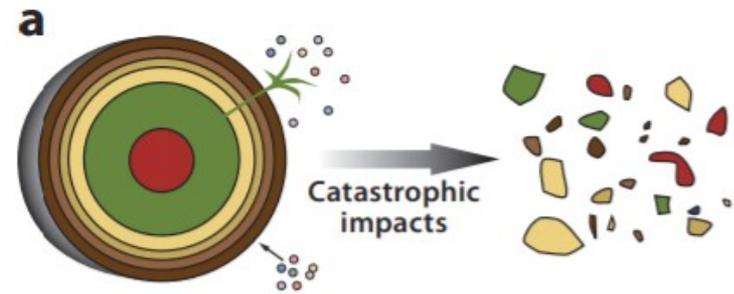
(E) Fragmentation of such differentiated or undifferentiated bodies could then produce the spectrum of observed asteroid and meteorite types. In fact, a variety of types could come from one body, as illustrated in (E). Most asteroids were not heated beyond the first or second step, and only a very few 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. Weiss¹ and Linda T. Elkins-Tanton, 2013, ARE&PS

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

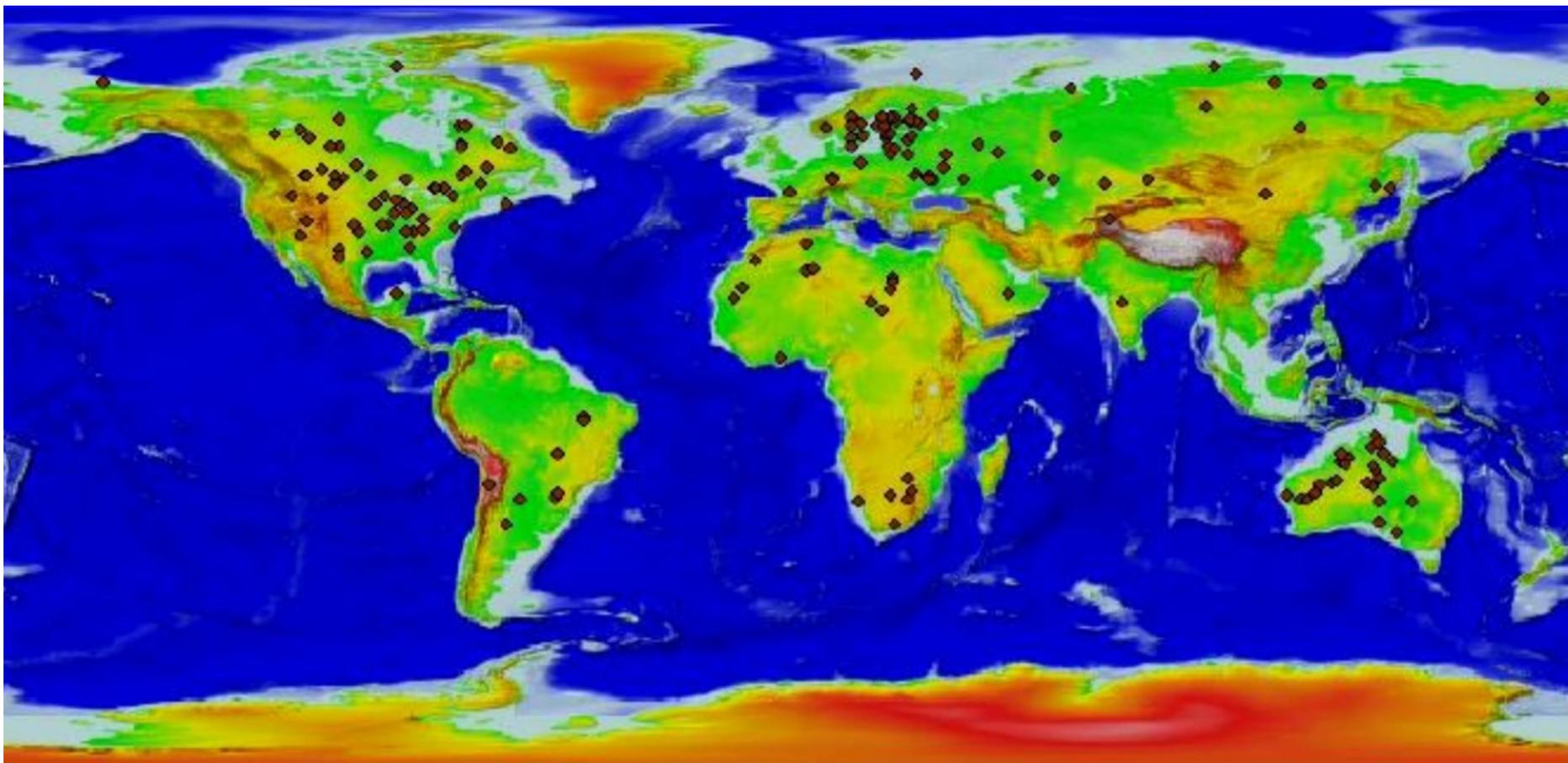


Um dos restos do asteroide que causou a cratera de Barringer:

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>

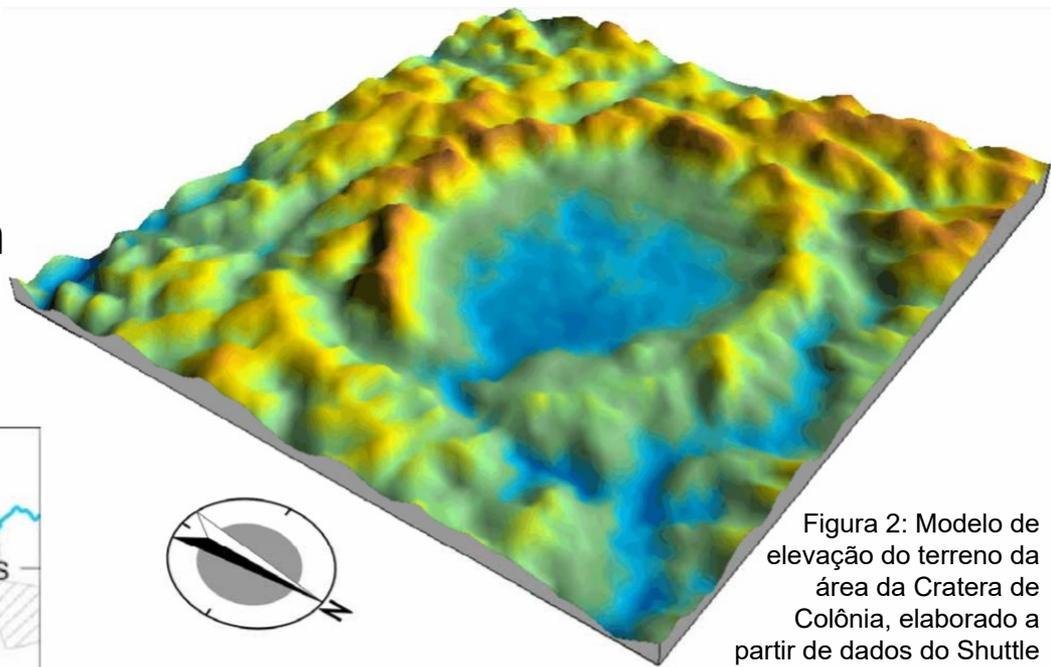


Figura 2: Modelo de elevação do terreno da área da Cratera de Colônia, elaborado a partir de dados do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), United States Geological Survey (USGS), 2002.

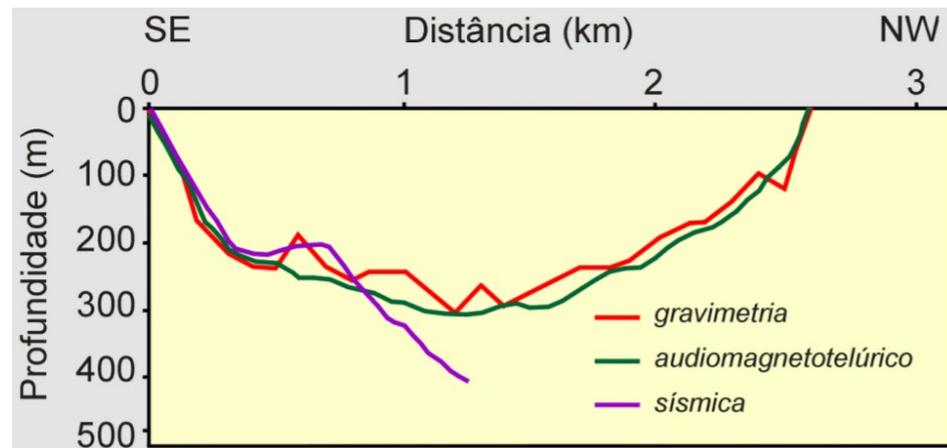
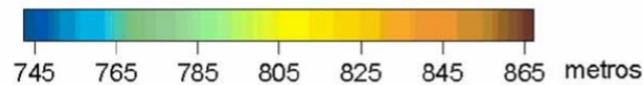


Figura 4: Seção de direção NW-SE da Cratera de Colônia elaboradas a partir de dados geofísicos (Riccomini et al., 1992 e Neves, 1998, modificados)



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)



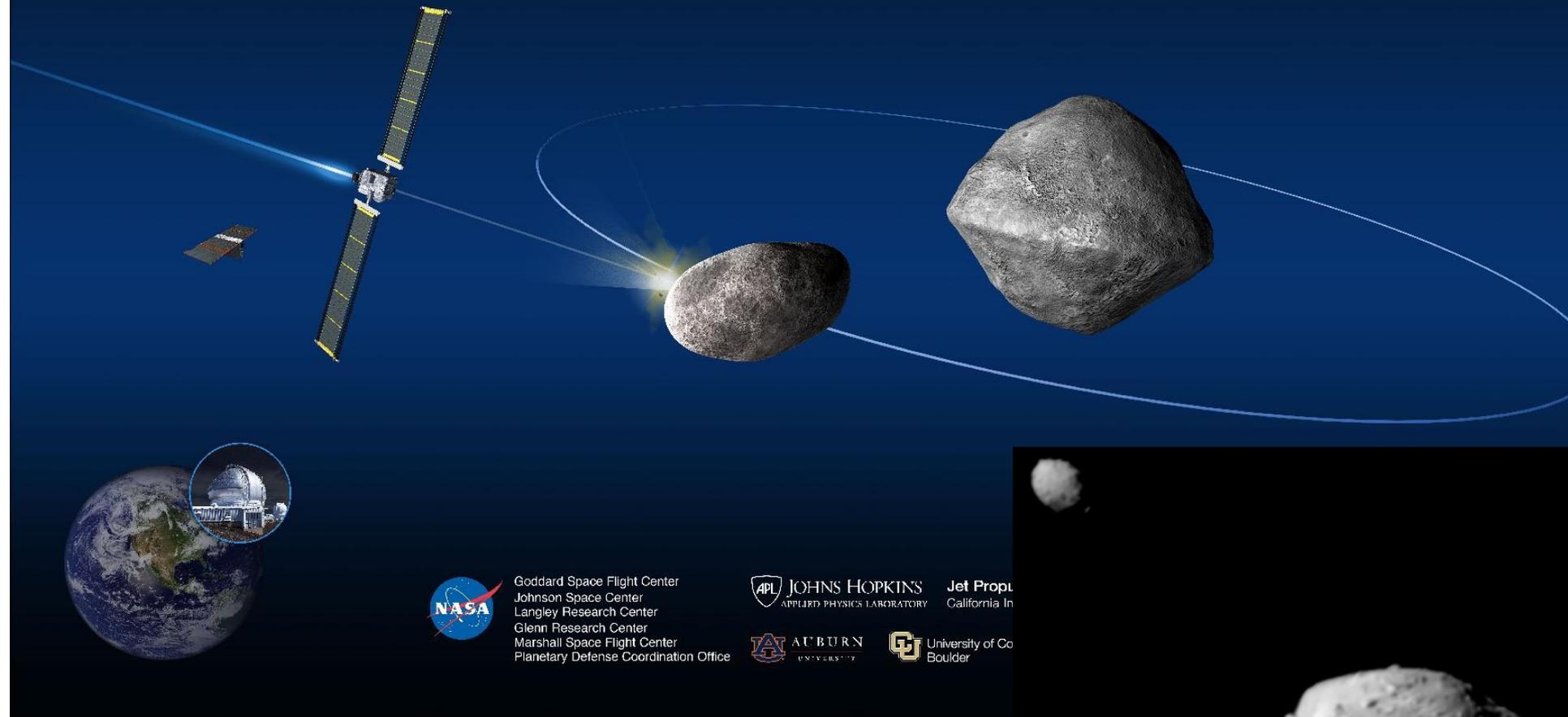
Iniciativa de Mapeamento e Pesquisa de Asteroides nas Cercanias da Terra no Observatório Nacional

<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

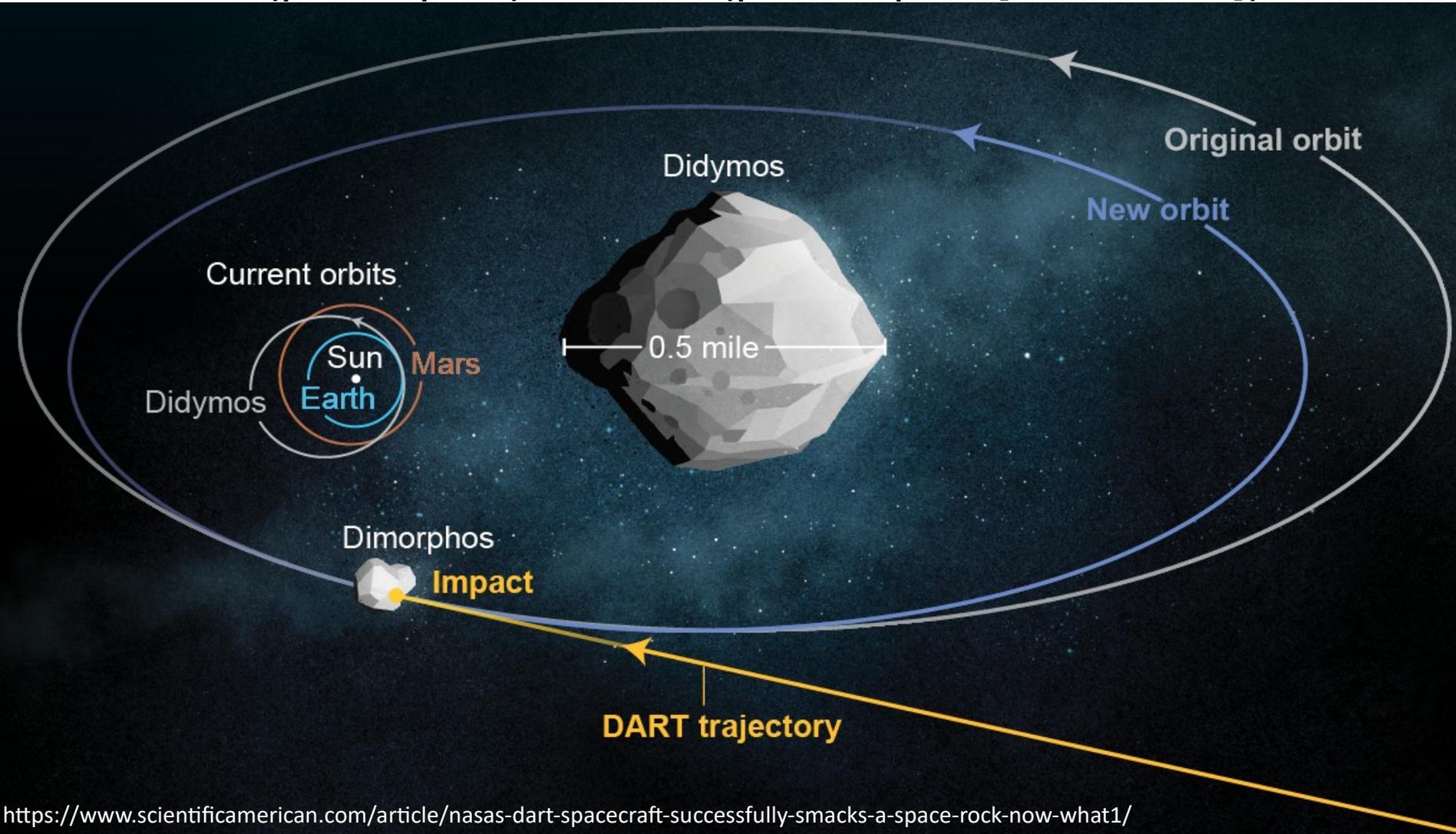


65803 **Didymos**. Mean diameter 780 m, $\rho = 2.2 \text{ g/cm}^3$

Aphelion 2.27 AU Perihelion 1.013 AU

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

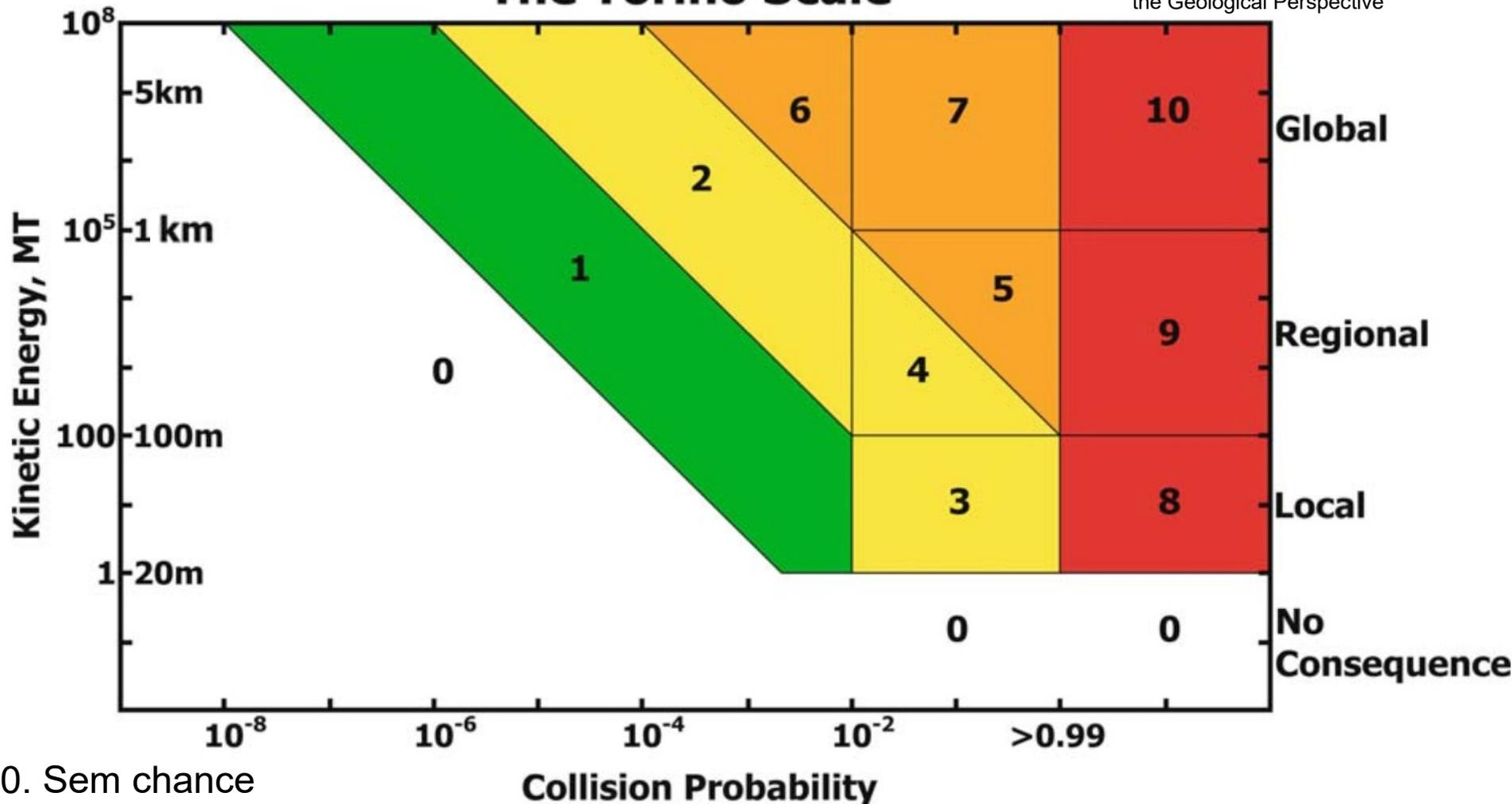
$P = 11\text{h}55\text{m}$ (pre-impact) $11\text{h}23\text{m}$ (post-impact [26/9/2022])



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."

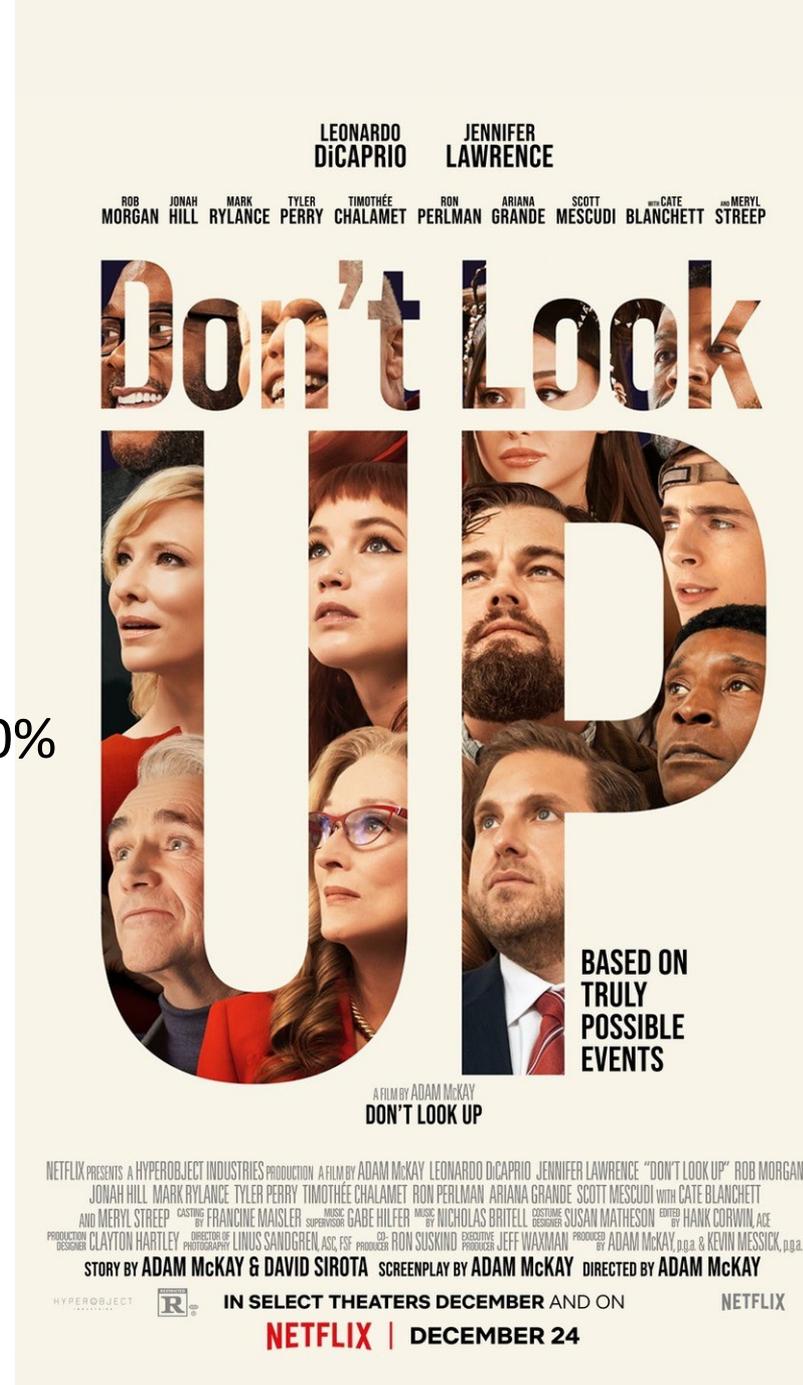
Dr. Mindy: "99.78%, to be exact."

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 meteoroide ou asteroide, grande o suficiente para sobreviver à entrada na atmosfera e atingir o solo.

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

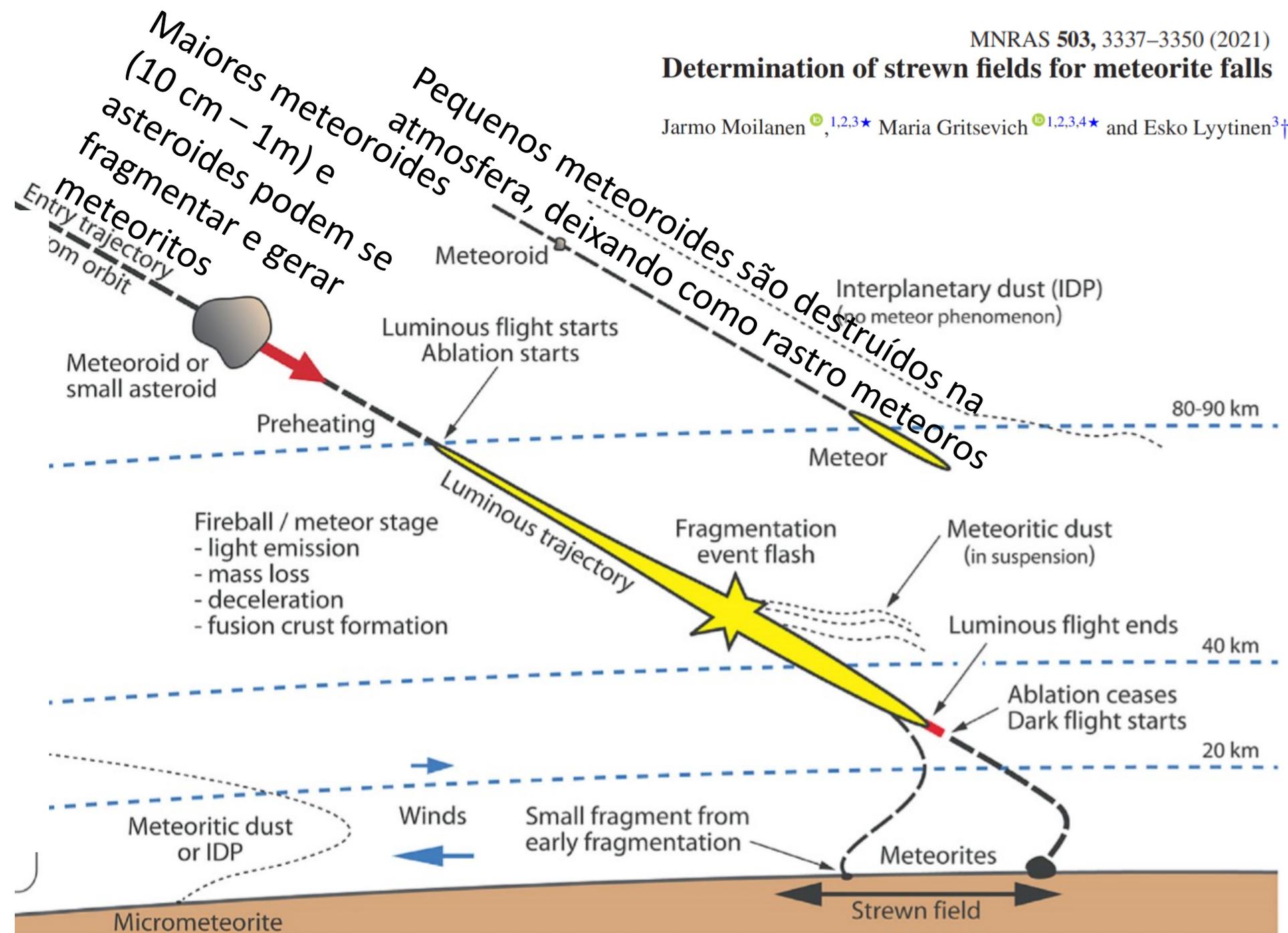
Meteorito: remanescente de meteoroide ou asteroide que sobrevive a entrada e atinge o solo

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

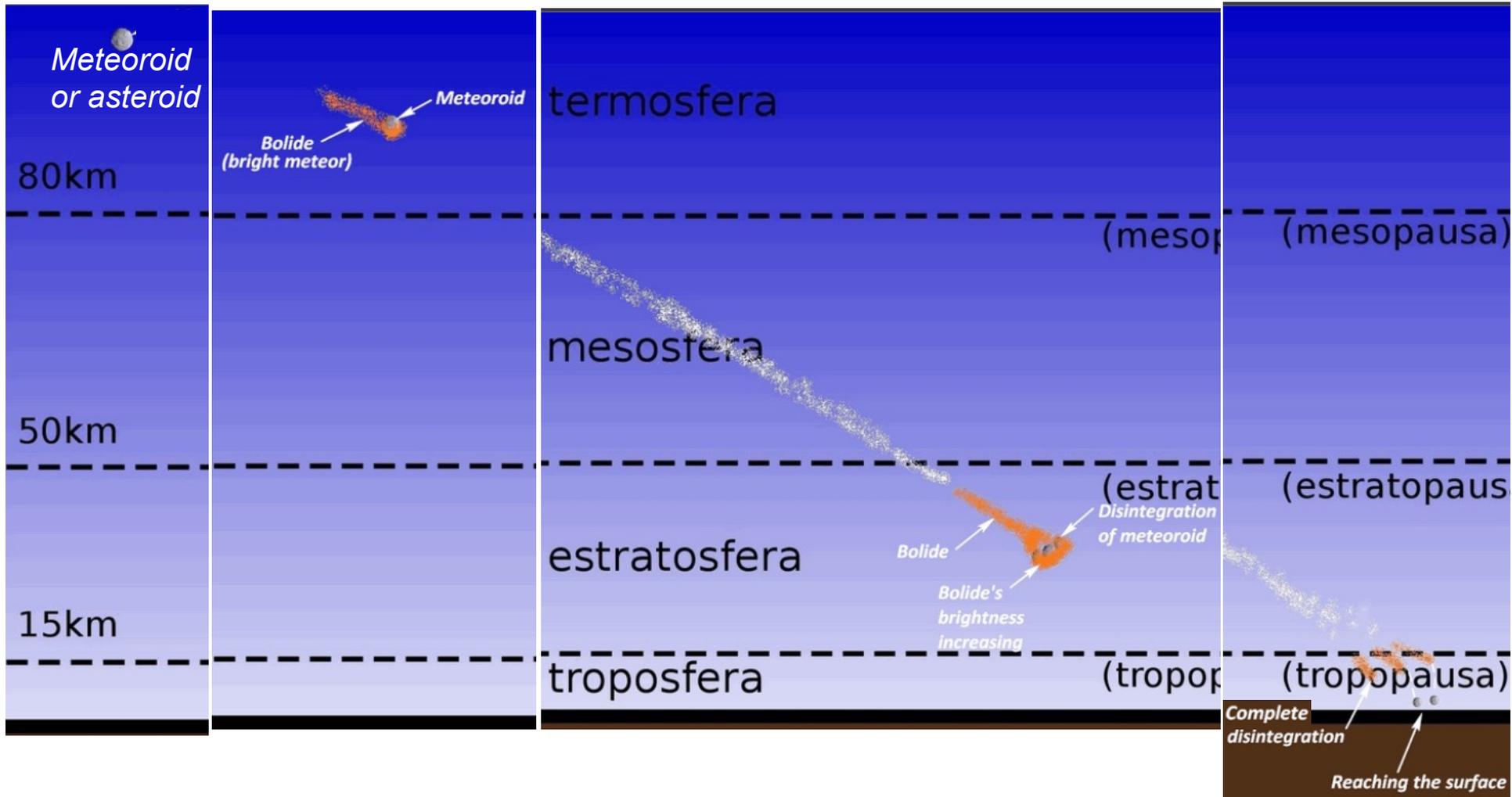
(c) Steed Yu,
12/2015



Determination of strewn fields for meteorite falls

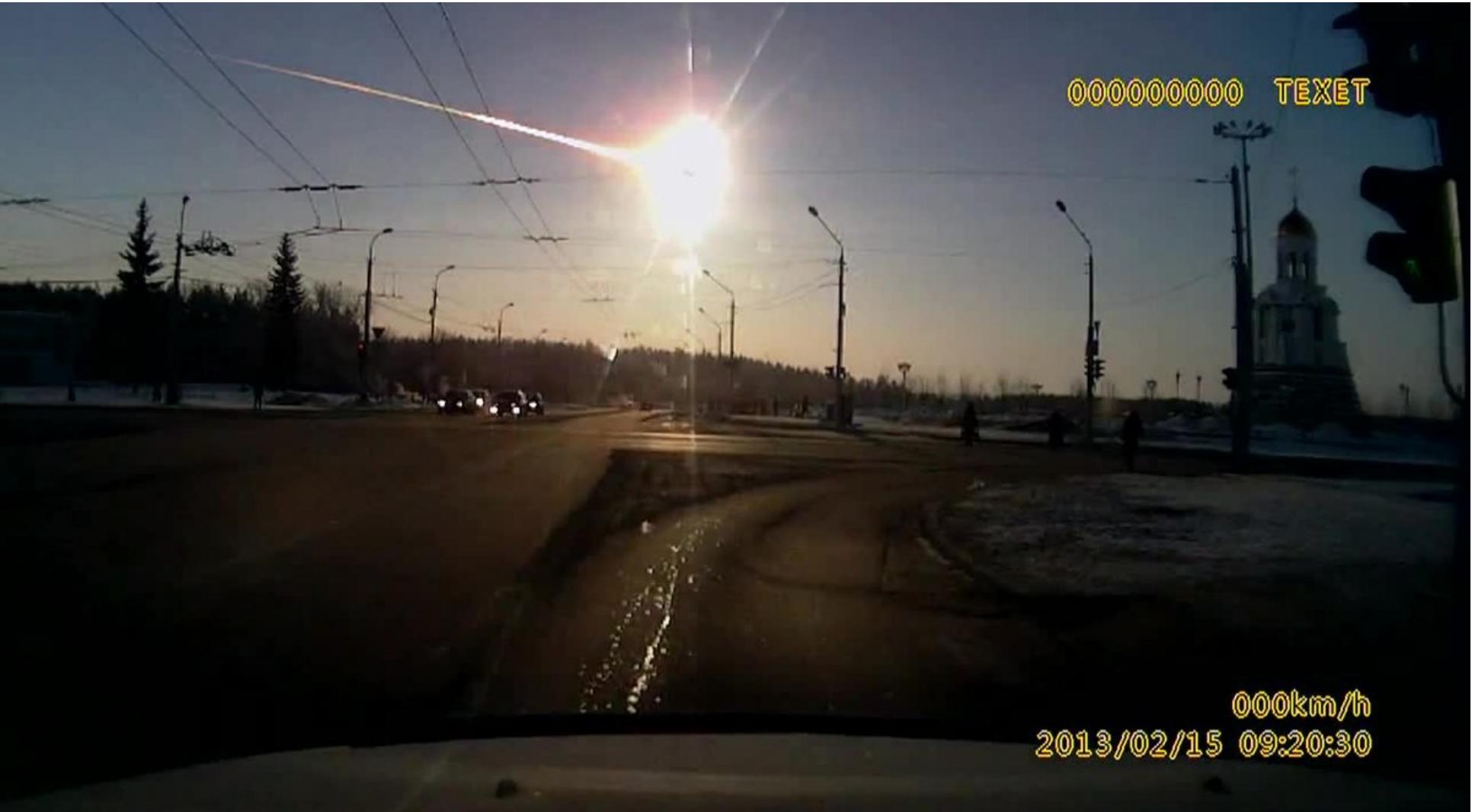
Jarmo Moilanen^{1,2,3}*, Maria Gritsevich^{1,2,3,4}* and Esko Lyytinen³†

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.



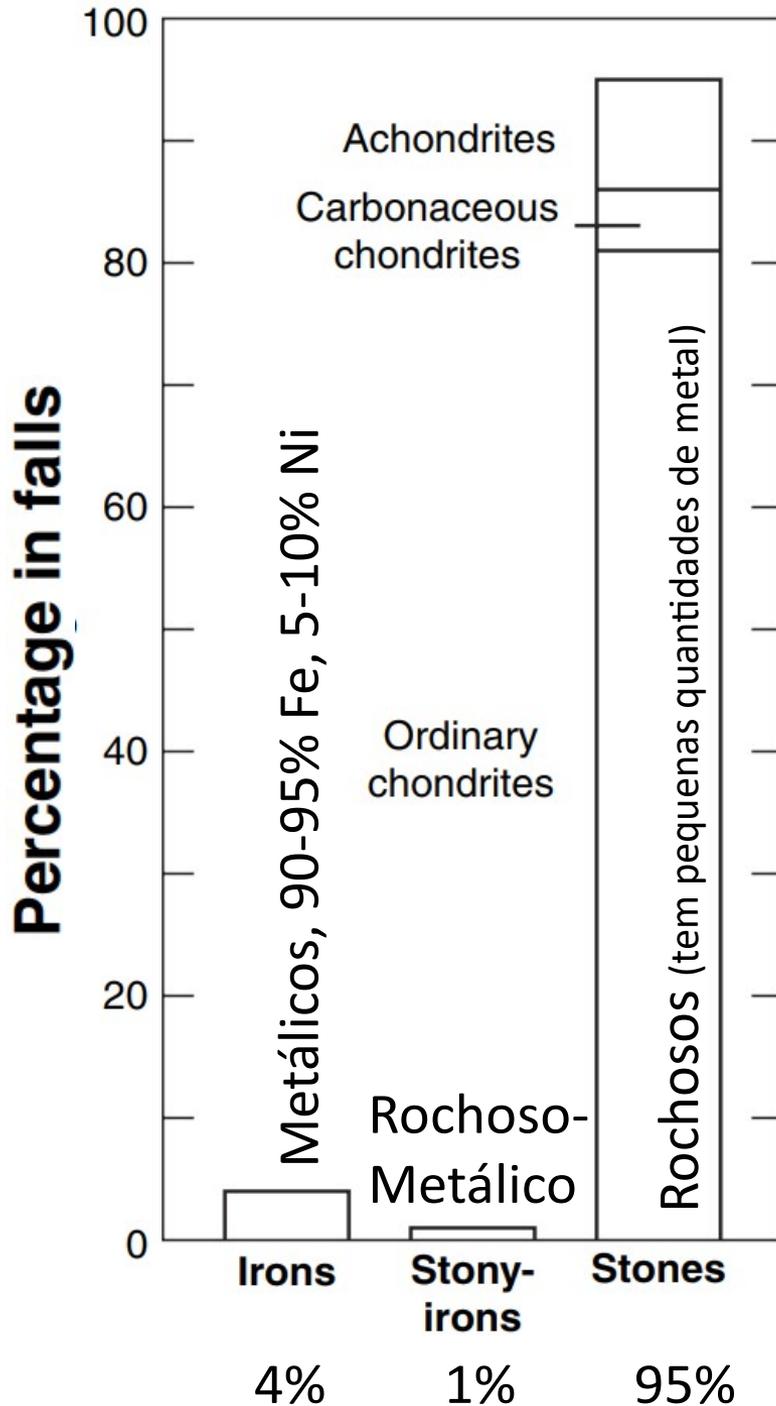
Fragmento recuperado do lago
Chebarkul em 16/10/2013.
Deixou buraco de 6m no lago.
Comprimento ~1 m e massa 650 kg



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



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)SiO₄ e
piroxênios
(Mg,Fe)SiO₃

Condritos ordinários (81%)



O condrito NWA 869 mostra fragmentos de metal e côneculos (objetos milimétricos quase esféricos, ricos em silicatos minerais como olivinas $(Mg,Fe)SiO_4$ e piroxênios $(Mg,Fe)SiO_3$

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 côndrulos circulares.

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

IRCA's são associadas à condensação inicial do S.S.

CI (Orgueil)

- composição ~Sol
- maior conteúdo volátil (até 22% H₂O)
- baixa ρ (2,2 g/cm³)
- quase sem côndrulos
- compostos orgânicos

CM (Murchison) / CV (Allende)

- 2 a 16% H₂O ligada a minerais
- côndrulos visíveis
- inclusões ricas em cálcio e alumínio (IRCA's)
- compostos orgânicos

CO

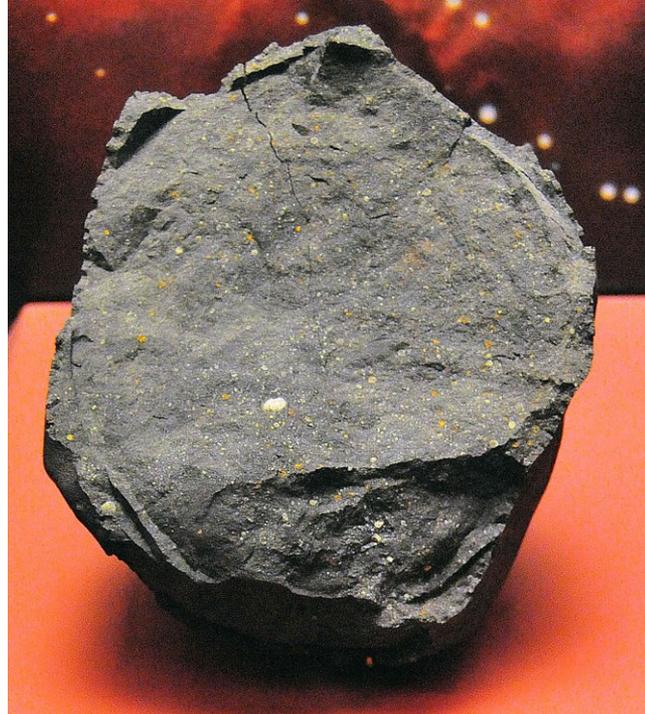
- Só 1% de H₂O ligada a minerais
- Composição similar a CV, porém mais escuros
- côndrulos e IRCA's

Murchison meteorite, 28/9/1969

https://en.wikipedia.org/wiki/Murchison_meteorite

Moss meteorite, 14/7/2006

https://en.wikipedia.org/wiki/Moss_meteorite



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

Inclusões ricas em cálcio e alumínio (IRCAAs).

Por exemplo grãos de Al_2O_3 (corundum), CaO (óxido de cálcio) e CaTiO_3 (perovskita = óxido de cálcio e titânio)

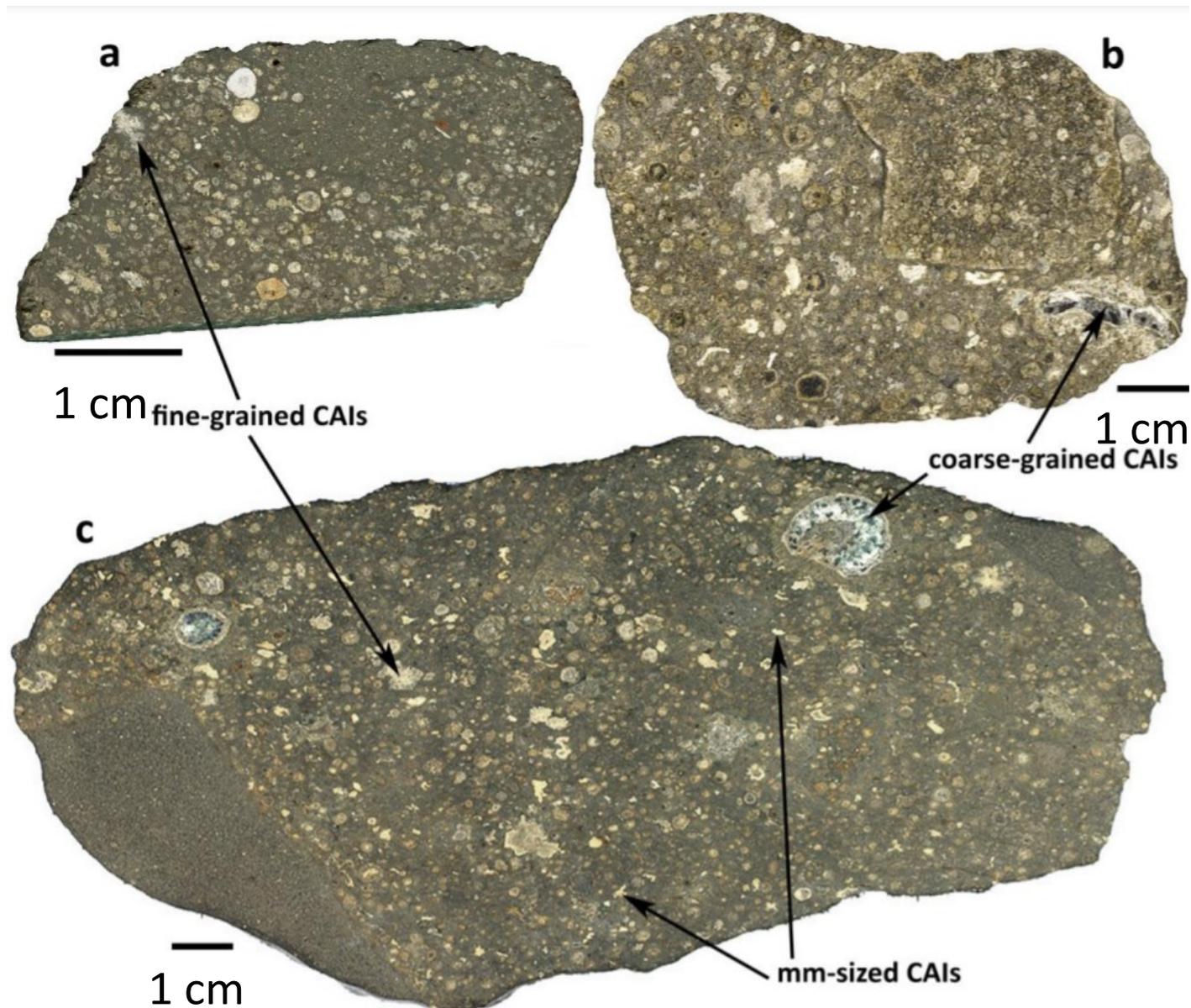
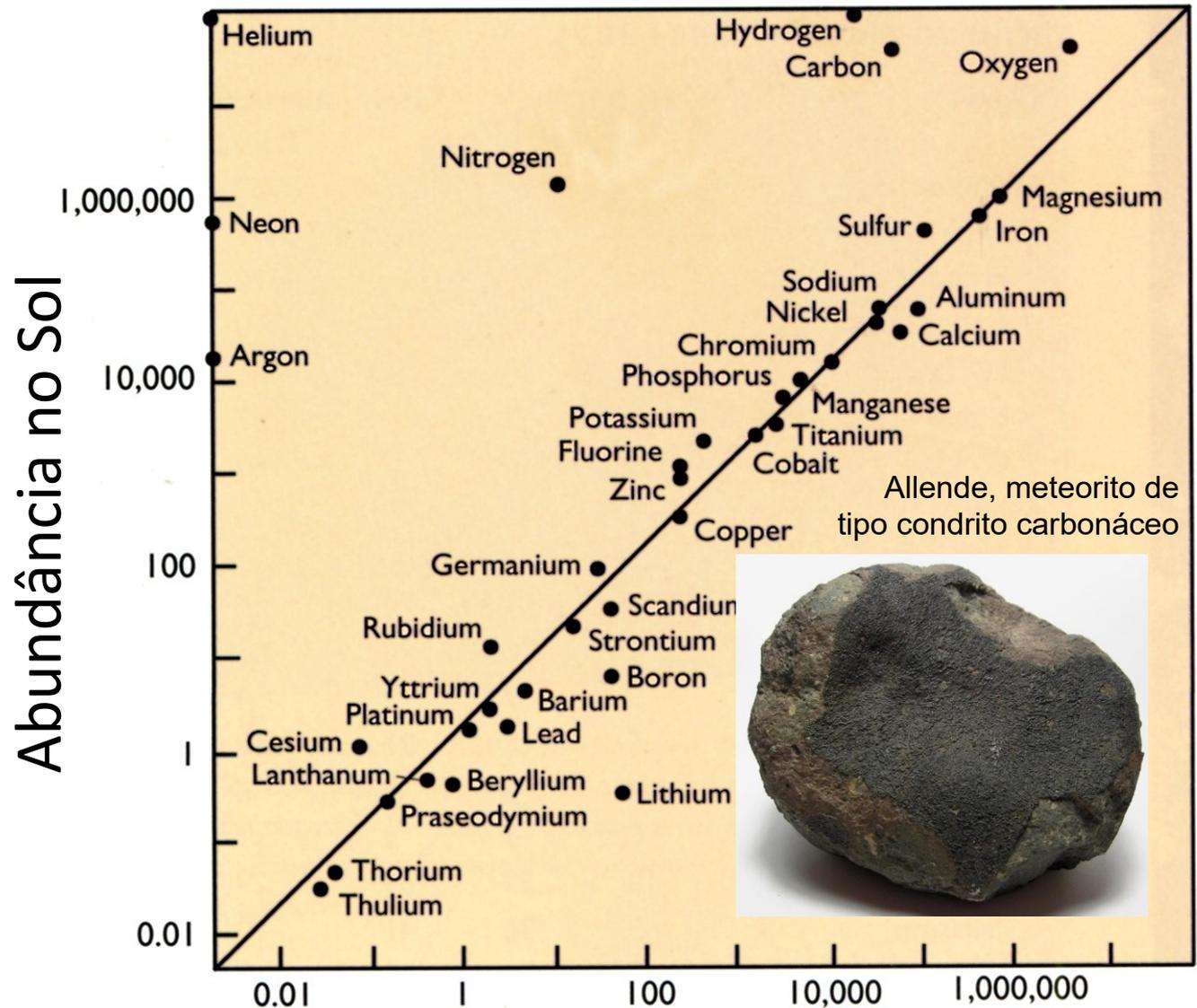


Figure 1: Representative scanned slabs of CV and CK carbonaceous chondrites used to establish the CAI size distributions in Chaumard et al. (2014) & the present study. (a) Allende, (b) NWA 2900, and (c) TNZ 057. Scale bars are 1 cm. Numerous CAIs are visible as whitish inclusions, with several examples 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%).



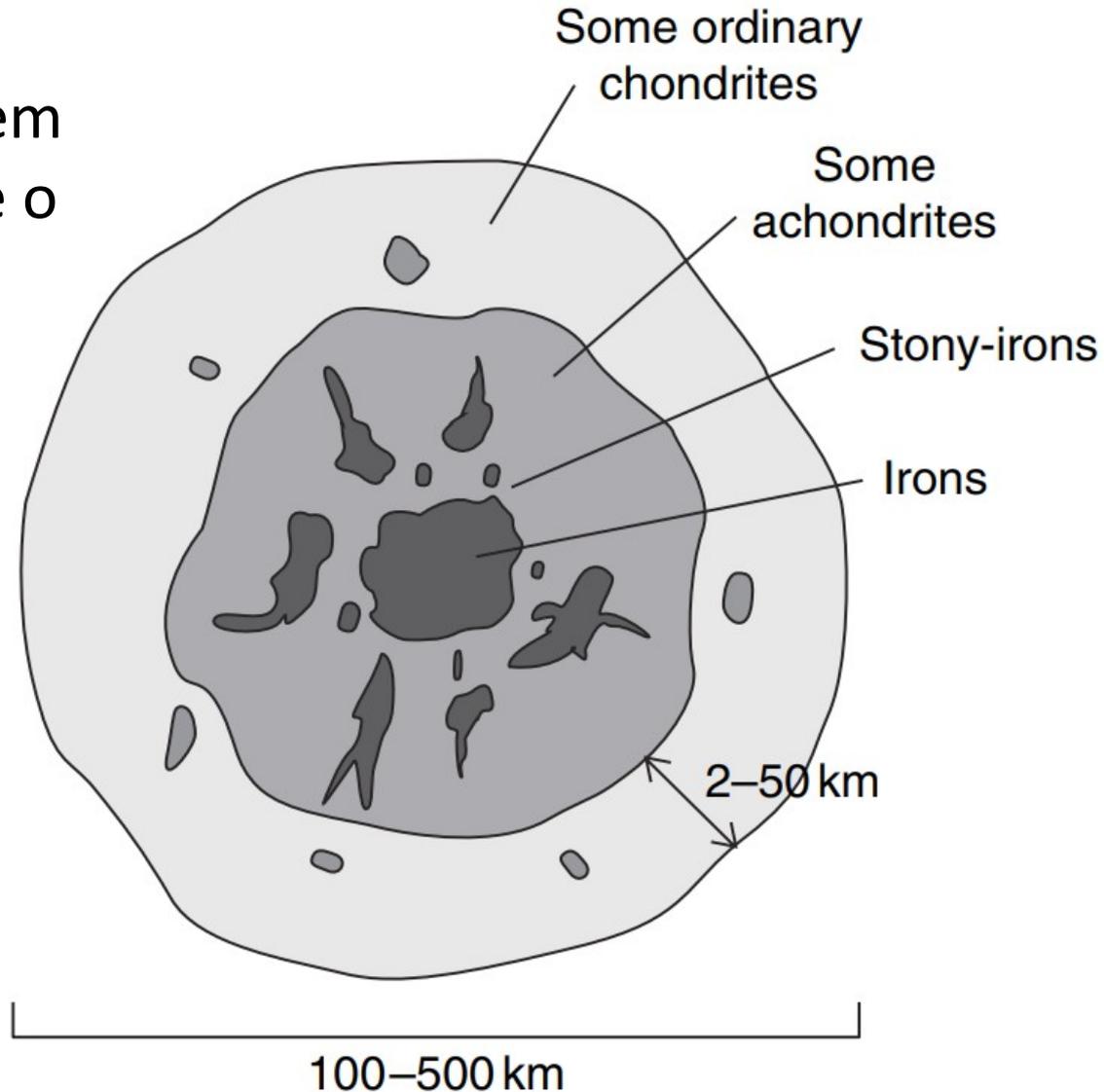
The Sikhote-Alin iron meteorite

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%)

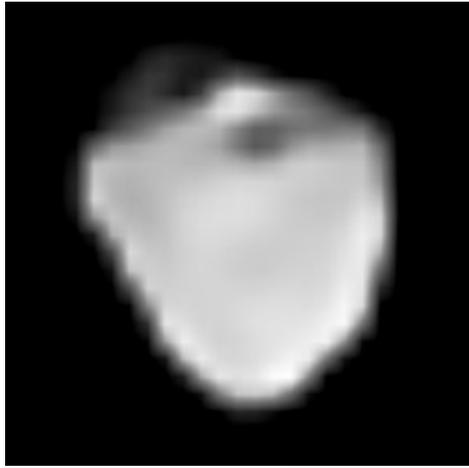
Mistura de ferro-níquel e minerais de silicato. Origem no limite entre o núcleo e o manto de um objeto diferenciado.

https://en.wikipedia.org/wiki/Stony-iron_meteorite

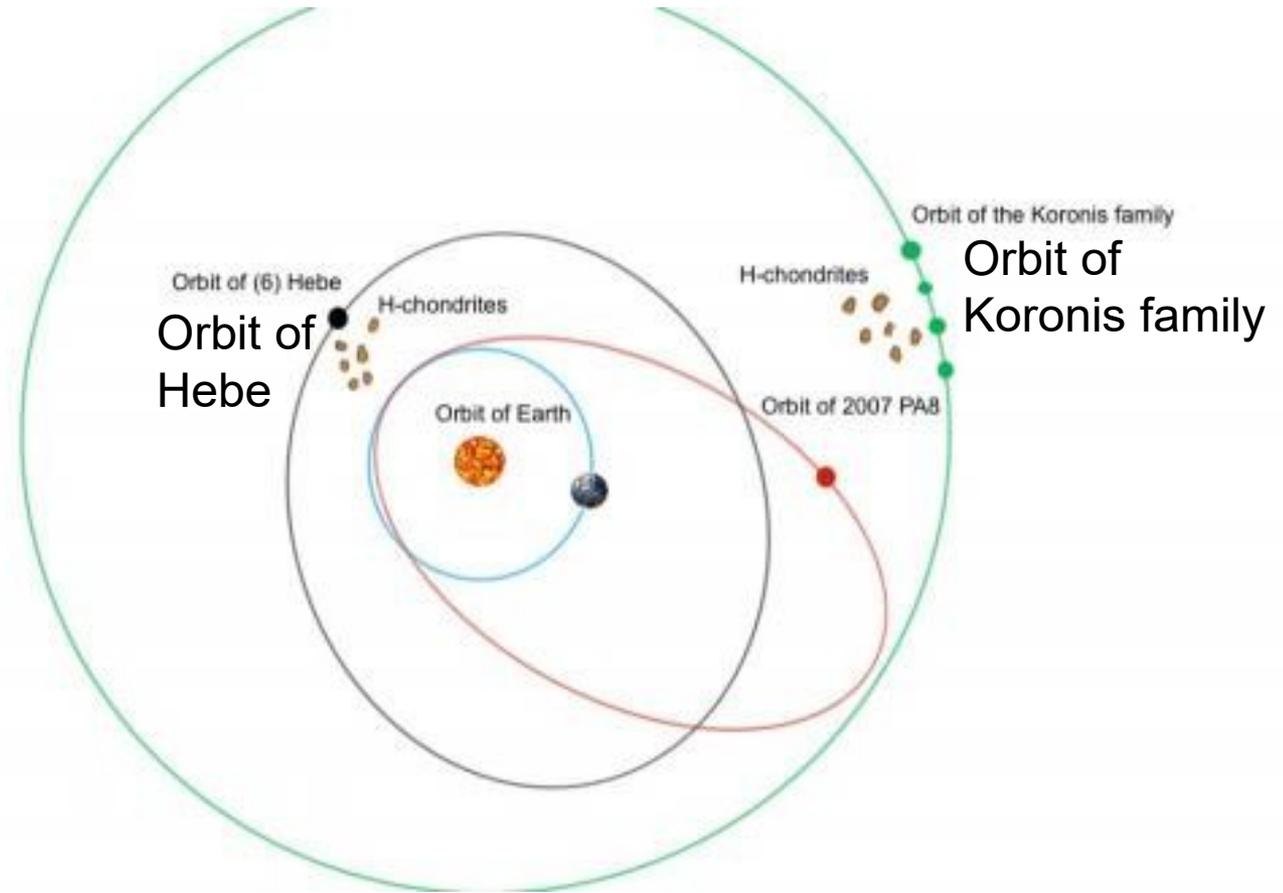


A slice of the Esquel meteorite showing the mixture of meteoric iron and silicates, typical of this class

Órbitas de origem de meteoritos condritos ordinários



Hebe
205 × 185 × 170 km
Densidade ~3,5 g/cm³



Órbitas de condritos carbonáceos

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

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



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

Flensburg (C1-ung)

Maribo (CM2)

Tagish Lake (C2-ung)

Mars Venus Earth

Jupiter

Sutter's Mill (C)

Região de origem dos meteoritos

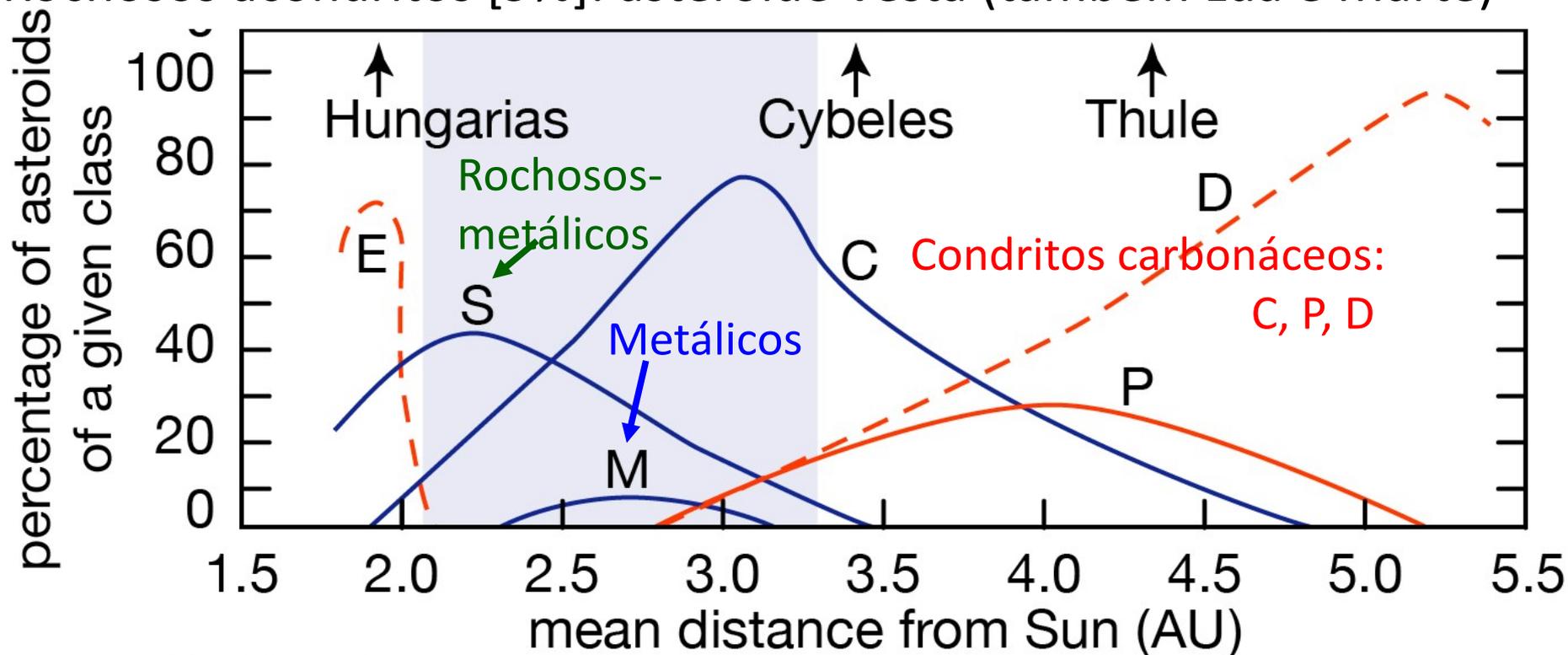
Metálicos [4%]: região de asteroides M

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

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

Rochosos condritos ordinários [81%]: alguns asteroides

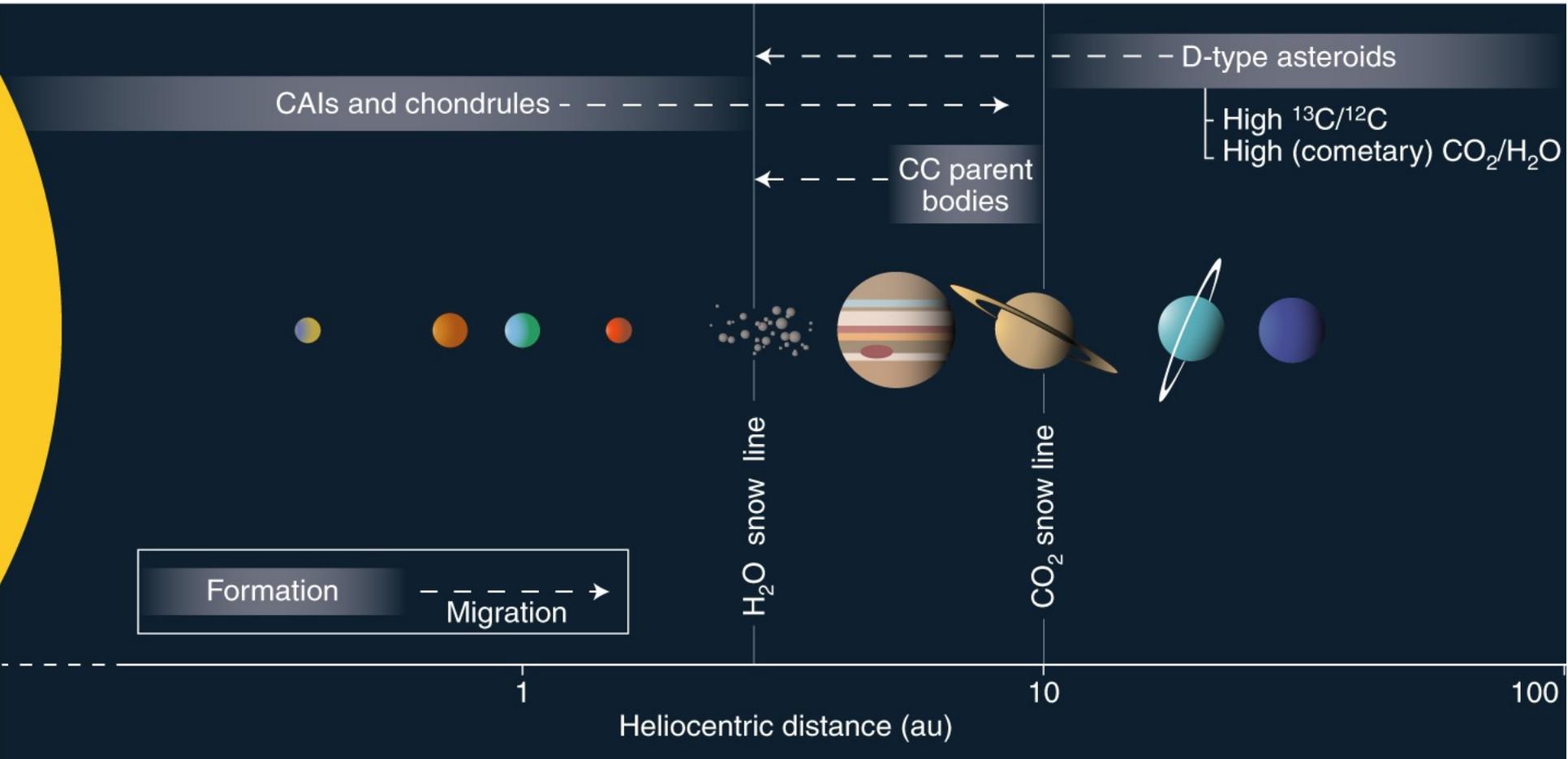
Rochosos acondritos [9%]: asteroide Vesta (também Lua e Marte)



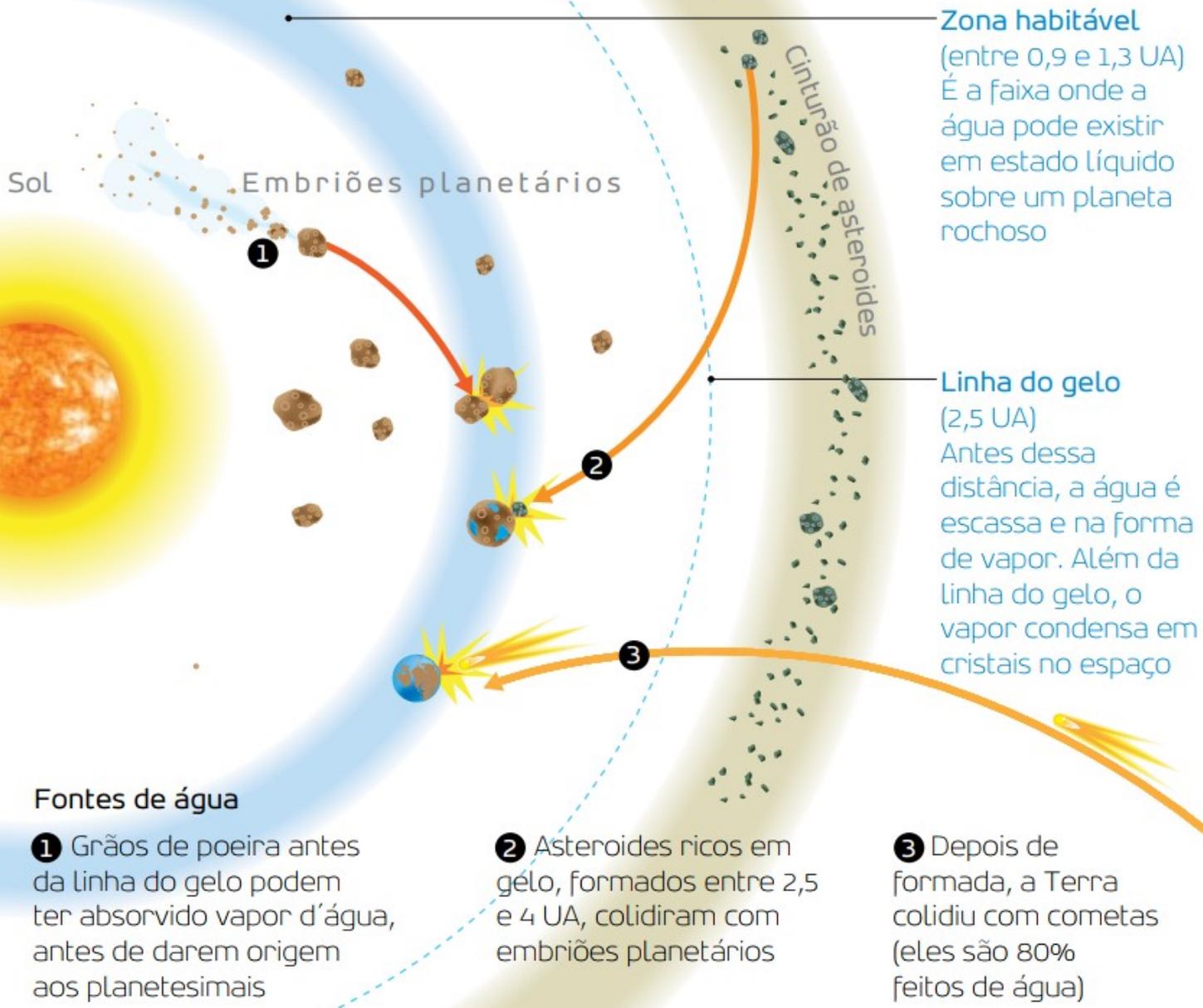
The tumultuous childhood of the Solar System

[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 Asteróides 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

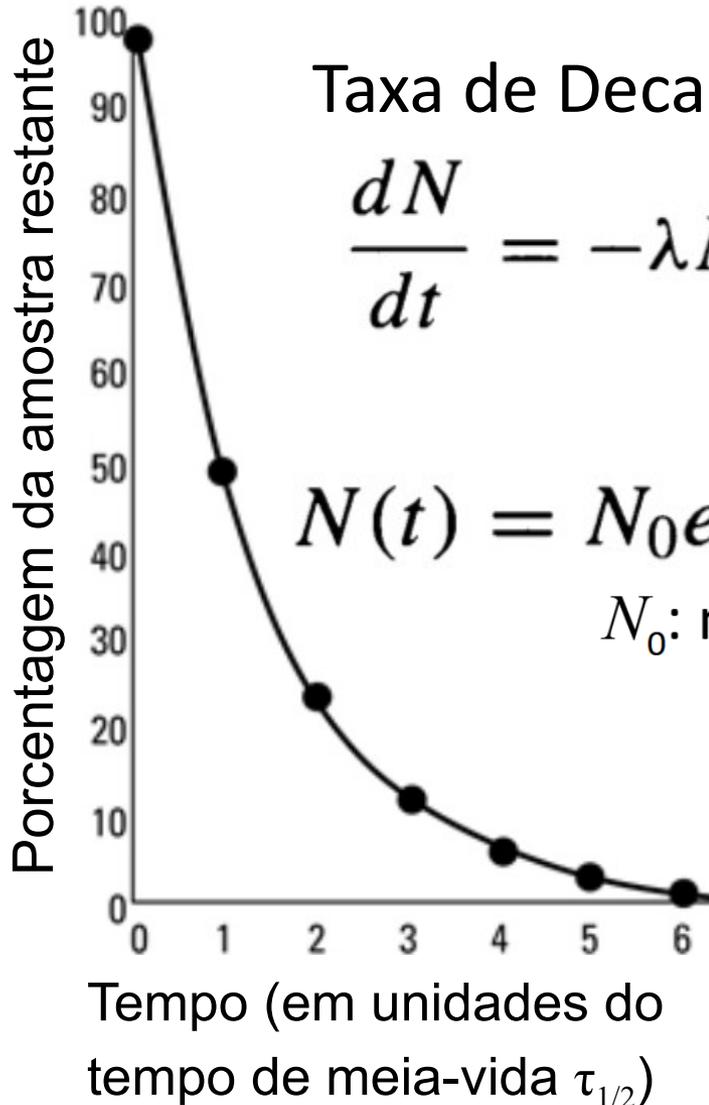
De onde vem a água da Terra.

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

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

Júpiter: alguns milhões de anos depois

Terra: ~ 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 Bouvier¹ & Meenakshi Wadhwa¹

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