



Universidade Federal do ABC

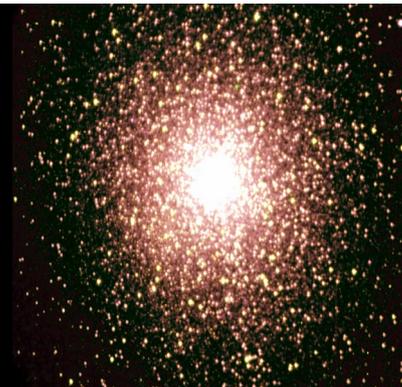
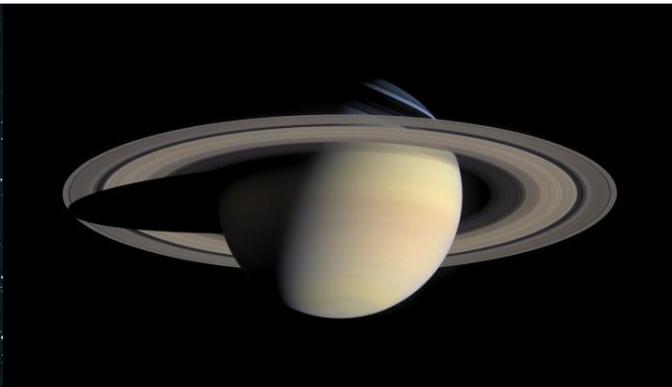
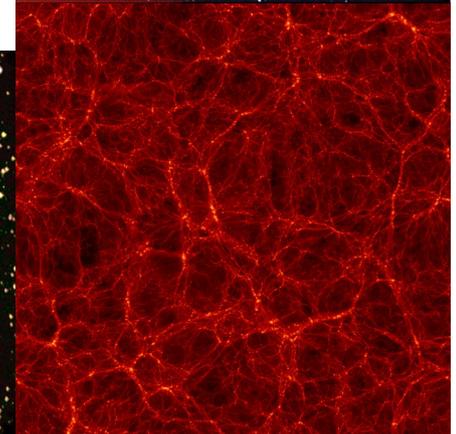
Noções de Astronomia e Cosmologia

5. Corpos Menores, Origem e Evolução do Sistema Solar.

Prof. Pieter Westera

pieter.westera@ufabc.edu.br

<http://professor.ufabc.edu.br/~pieter.westera/Astro.html>



Corpos Menores do Sistema Solar

Além dos planetas e suas luas, tem milhares de **corpos menores** orbitando o Sol.

Eles podem ser classificados em três grupos:

- **Asteroides**: corpos **rochosos**, ≥ 100 m, muitos deles em órbitas entre Marte e Júpiter, na **Cintura de Asteroides**.
- **Objetos TransNetunianos** (TNOs): corpos **gelosos** em órbitas além da de **Netuno**, em regiões chamadas **Cintura de Kuiper** e **Nuvem de Oort**.
- **Cometas** periódicos: corpos **gelosos** que passam maior parte do tempo na **Cintura de Kuiper** ou na **Nuvem de Oort**, e periodicamente passam pelo SS interior.
- Cometas não-periódicos estão só de passagem, eles não fazem parte do Sistema Solar.

Asteroides

Em 1766, Johann Titius detectou uma **regularidade** nas **distâncias médias** dos **planetas** do **Sol**, popularizada mais tarde por Johann Elert Bode, a **Lei de Titius-Bode** (a é a distância média Sol – n -ésimo planeta em AU):

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

A lei **prevê** bem as **distâncias** de **Vênus a Saturno** e até de **Urano**, que ainda não tinha sido descoberto em 1766 (detalhe: para Mercúrio se tem que usar $2^n = 0$, e não $2^n = 2^{-1} = 0.5$).

| Planeta | n | a [AU] | a real [AU] |
|----------|-----------|----------|---------------|
| Mercúrio | $-\infty$ | 0.4 | 0.39 |
| Vênus | 0 | 0.7 | 0.72 |
| Terra | 1 | 1.0 | 1.00 |
| Marte | 2 | 1.6 | 1.52 |
| ? | 3 | 2.8 | |
| Júpiter | 4 | 5.2 | 5.20 |
| Saturno | 5 | 10.0 | 9.58 |
| (Urano) | 6 | 19.6 | 19.20 |
| (Netuno) | 7 | 38.8 | 30.05 |
| (Plutão) | 8 | 77.2 | 39.48 |

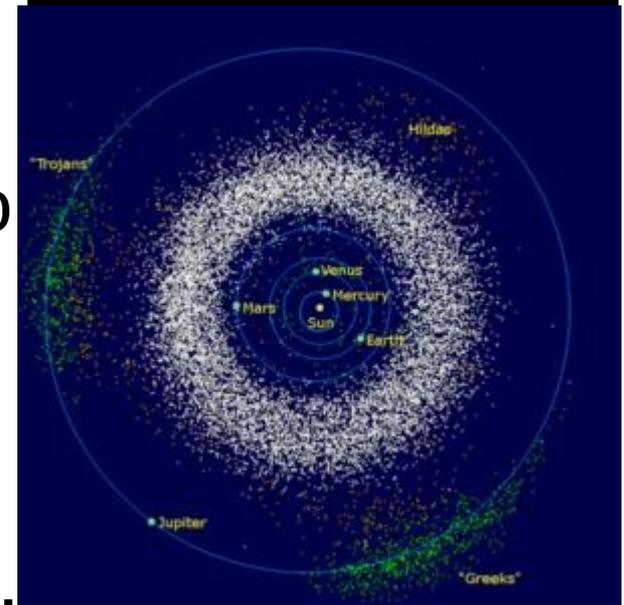
Asteroides

A Lei de Titius-Bode **prevê** um **planeta** a 2.8 AU do Sol, **entre Marte** e **Júpiter**.

Em 1801 Giuseppe Piazza encontrou um objeto a 2.77 AU do Sol de diâmetro ~1000 km, e chamou-o **Ceres** (♀), o **primeiro asteroide descoberto**.

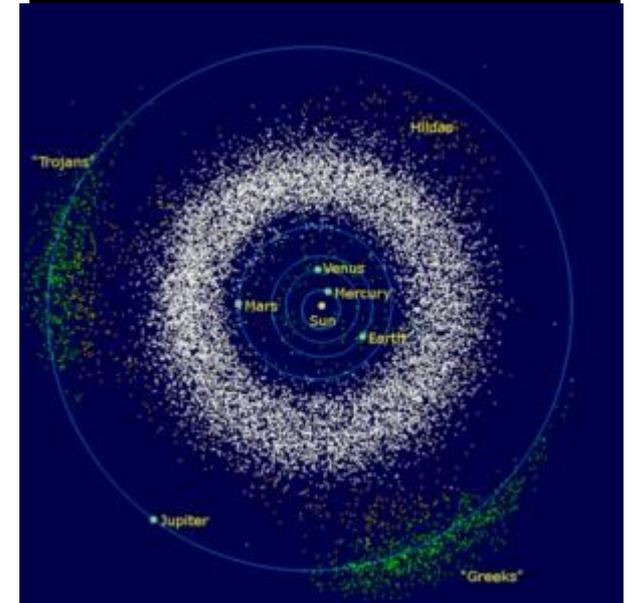
Primeiro, 1 Ceres foi considerado um planeta, mas com a descoberta de mais objetos similares (2 Pallas, 3 Juno e 4 Vesta) criaram o termo asteroide.

Desde então encontraram >100 000 asteroides na região entre 2 e 3.5 AU do Sol, chamada **Cintura de Asteroides**.



Asteroides

Apesar da previsão correta das distâncias de Urano e Ceres, hoje (após a descoberta de Netuno) os astrônomos acreditam que a Lei de Titius-Bode é só um acaso.



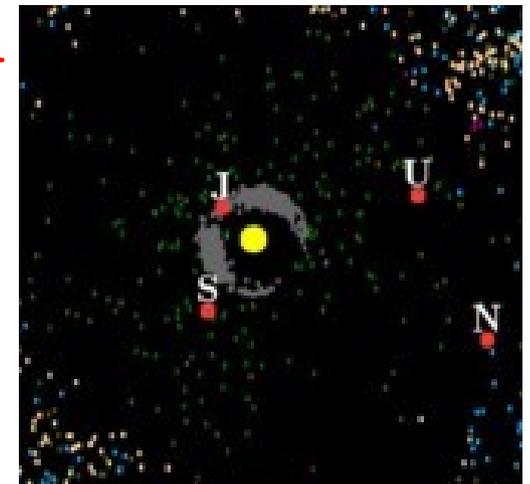
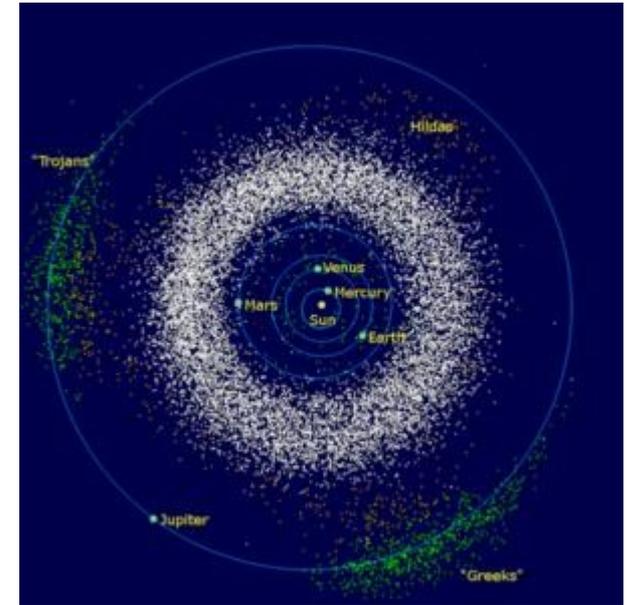
Asteroides

A maioria dos asteroides se encontra na Cintura de Asteroides, mas alguns seguem outras órbitas:

- Os **Troianos** (pontos cinzas) se encontram nos pontos lagrangianos L_4 e L_5 do sistema Sol-Júpiter

(=> aula sobre Estágios Finais da Evolução Estelar, parte estrelas binárias), compartilhando a **órbita de Júpiter**, 60° na frente ou atrás do planeta gigante; os na frente, no ponto L_4 são, às vezes chamados **Gregos**.

- Os **Centauros**, com órbitas entre as dos planetas externos).



cinza: troianos, verde: centauros

Asteroides

- Os **Amors**, **Apollos** e **Atens** orbitam no **Sistema Solar interno**, podendo cruzar as órbitas dos planetas internos. Asteroides inicialmente no cinturão que sofreram perturbações de Júpiter?
Entre eles há objetos interessantes como 3753 Cruithne (um Aten), em ressonância 1:1 com a Terra, e 2016 HO₃ (um Apollo), "quasi-satélite" da Terra.
- Alguns formam famílias, e acredita-se que tais famílias, chamadas **famílias Hirayama**, consistem de fragmentos de corpos maiores destruídas em colisões.

Asteroides

Os asteroides podem ser **classificados** segundo as suas **composições**, determinadas pelos seus **espectros**:

- tipo S: De 2 a 3.5 AU do Sol, silicatos ricos em ferro e magnésio, poucos voláteis, avermelhados, albedos moderados: 0.1-0.2
- tipo M: 2 a 3.5 AU, ferro e níquel, avermelhados, albedos moderados: 0.1-0.18



Asteroides

- tipo C: 2 a 4 AU, maioria perto de 3 AU, compostos carbonáceos, muitos contêm água, escuros, albedos baixos: 0.03-0.07
 - tipo P: 3 a 5 AU, maioria ~4 AU, compostos orgânicos, avermelhados, albedos baixos: 0.02-0.06
 - tipo D: similar aos tipo P, mas mais vermelhos e um pouco mais longes do Sol, a maioria dos Troianos são tipo D
- => Quanto **mais longe** do **Sol**, tanto **mais água** e outros **voláteis**, a mesma tendência que para os **planetas** e **luas**.
- => Dica sobre a **formação** do **Sistema Solar**.

Mathilde, tipo C



Cybele, tipo P



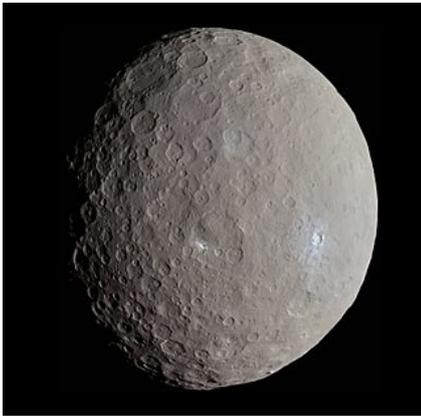
Hektor, tipo D,



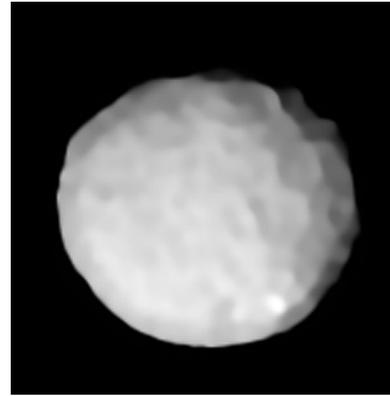
Asteroides

Os maiores Asteroides

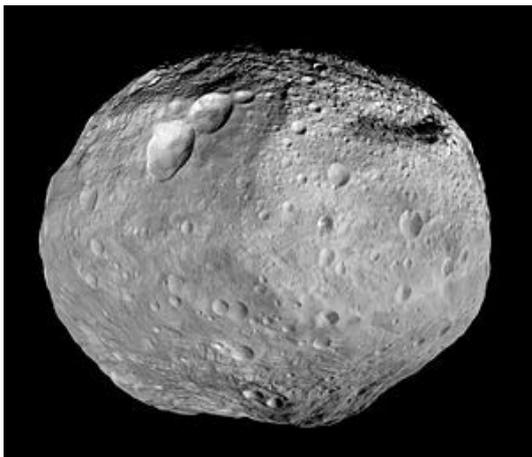
Ceres ♃ (diâmetro 952 km)



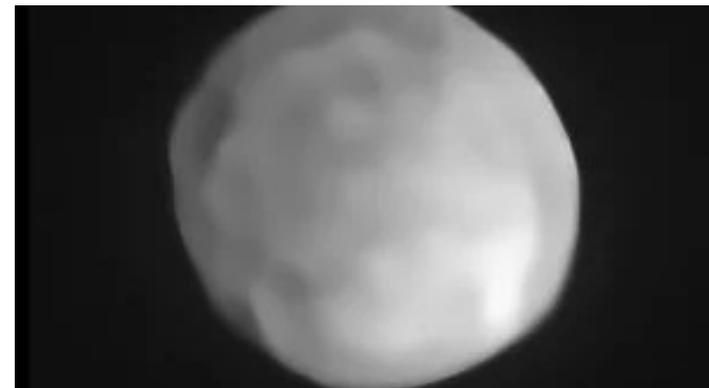
Pallas ♃ (544 km)



Vesta ♃ (525 km)



Hygeia ♃ (431 km)

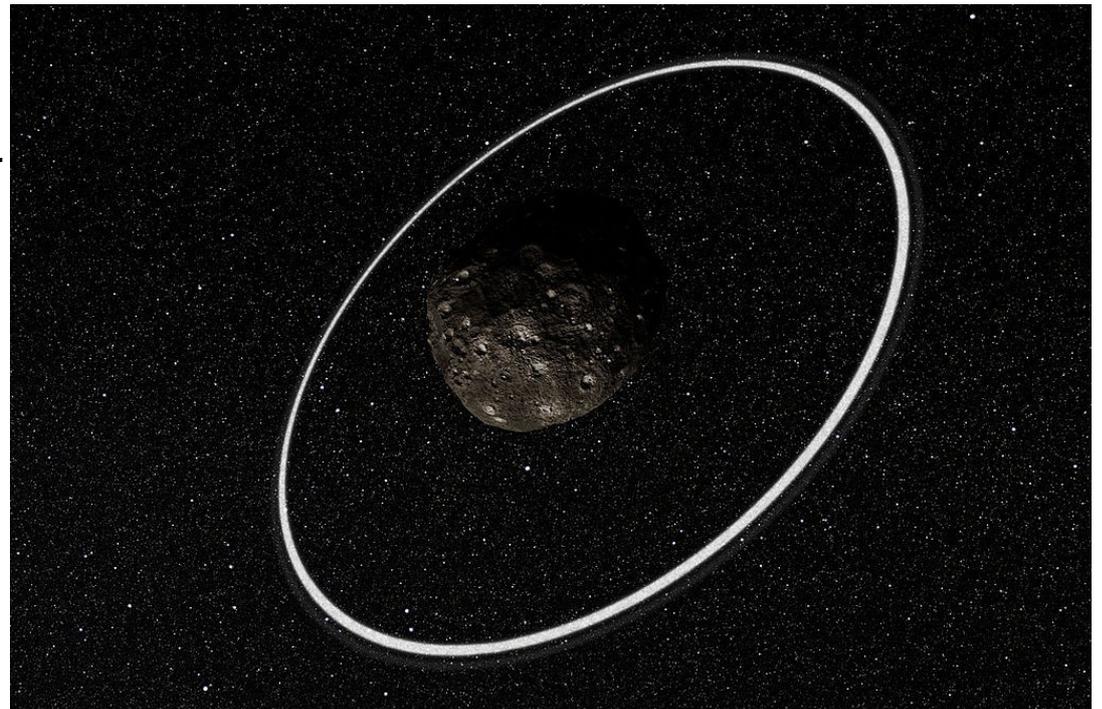


Asteroides

Anéis um torno de Asteroides

Em 2014, astrônomos anunciaram a descoberta de dois **anéis** em torno de 10199 Chariklo (um centauro), por ocultação estelar.

A origem destes anéis não é muito clara.



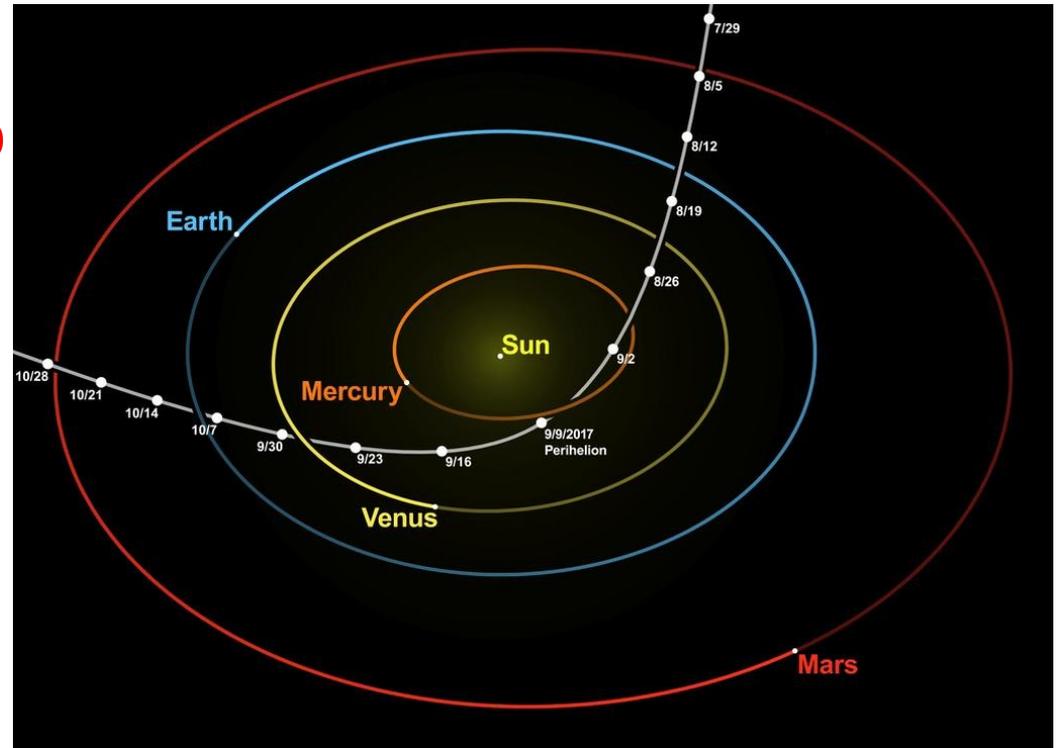
Chariklo com seus áneis (interpretação artística)

Asteroides

Asteroide de fora do Sistema Solar

Em setembro 2017, passou perto do Sol o primeiro **objeto interestelar** conhecido pelo Sistema Solar, 1I/2017 U1 (Oumuamua).

Inicialmente suspeito de ser um cometa, foi reclassificado como asteroide e finalmente como primeiro de uma nova classe de objetos interestelares.



Trajetório de Oumuamua

Deste então já foi descoberto um segundo objeto interestelar (24/09/2019): 2I/Borisov

Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

Matéria no espaço interplanetário que é muito **pequena** para ser chamado asteroide ou cometa, e em **rota** de **colisão** com a **Terra** é chamado **Meteoroides**.

Se queimado na atmosfera: **Meteoro**, ou estrela cadente

Se resta algo chegando no chão: **Meteorito**



Meteoro



Cratera de meteorito em Arizona, EUA

Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

Chuvas de Meteoros

Quando a **Terra cruza** a **trilha** de **detritos** deixada por um **cometa** (cometas: em breve nesta aula), ocorre um **número elevado** de **estrelas cadentes**, chamado **chuva de meteoros**.

Os meteoros parecem vir todos da **mesma direção**, a direção do movimento dos detritos relativo ao movimento da Terra, chamada **radiante**.

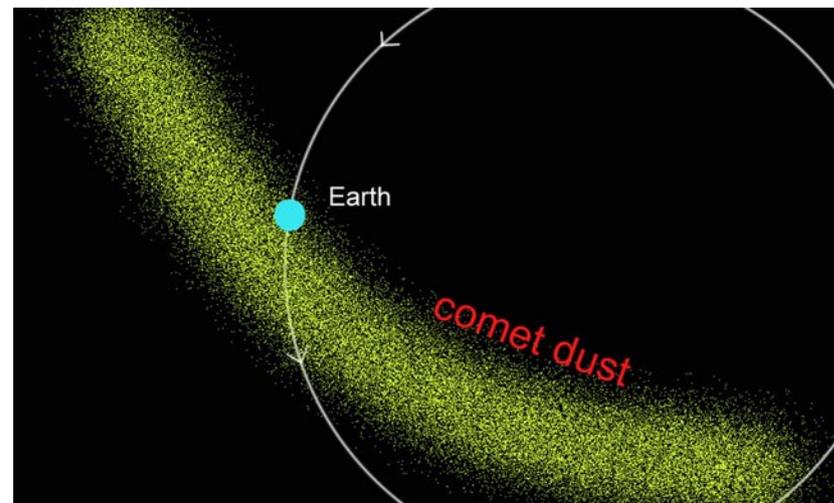


Foto de longa exposição durante os Geminídeos

Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

Chuvas de Meteoros

Chuvas de meteoros são fenômenos **periódicos anuais**, e ganham o nome da **constelação**, de onde elas parecem vir (onde fica o radiante).

As mais conhecidas e intensas são as Perseidas, em agosto, e as Leônidas, em novembro.

| Nome | Máximo | Taxa Horária* | Constelação |
|------------------|-------------|---------------|-------------|
| Quadrantídeas | 04 Jan | 95 | Bootes |
| Lirídeas | 22 Abr | 15 | Lyra |
| Eta-Aquarídeas | 05 Mai | 30 | Aquarius |
| Delta-Aquarídeas | 29 Jul | 20 | Aquarius |
| Perseídeas | 13 Ago | 95 | Perseus |
| Orionídeas | 22 Out | 20 | Orion |
| Taurídeas | 03 - 13 Nov | 15 | Taurus |
| Leonídeas | 18 Nov | 12 | Leo |
| Geminídeas | 14 Dez | 90 | Gemini |



Foto de longa exposição durante os Geminídeos

Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

Meteoritos

Têm **idades** de **~4.5 bilhões de anos**, e são amostras de matéria dos **primórdios** do **Sistema Solar**, embora em muitos casos as propriedades deles tenham sido modificadas por processos térmicos-metamórficos.

Ajudaram muito no **estudo** da **formação** e **evolução** do **Sistema Solar**.

Dividem-se em três grupos:

- **Rochosos**
- **Ferrosos rochosos**
- **Ferrosos.**

Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

Meteoritos Rochosos

Representam ~94 % dos meteoritos conhecidos.

- **Condritos**, ~86 %, são chamados assim por conterem **côndrulos**, pequenas partículas redondas, compostas na maioria por silicatos.

Parecem ter se formado como objetos flutuando livremente no espaço.

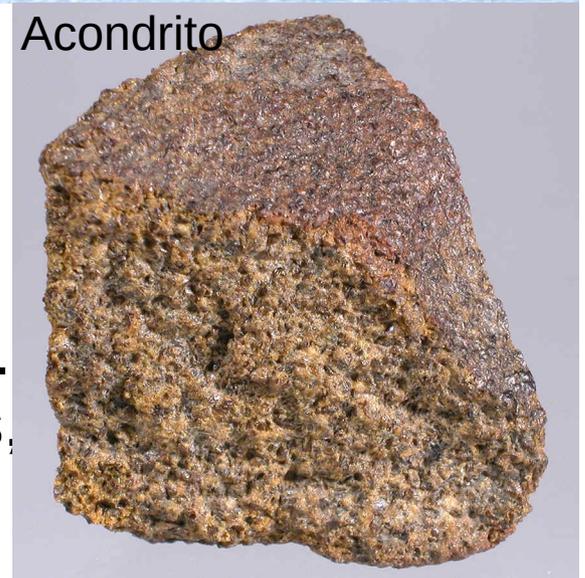
Alguns contêm material **orgânico**.

- **Acondritos**, ~8 %, não contêm côndrulos, formados pelo derretimento e recristalização. Vêm de **crostas** de **planetesimais**, asteróides, ou corpos maiores (a Lua, Marte)

Condrito



Acondrito



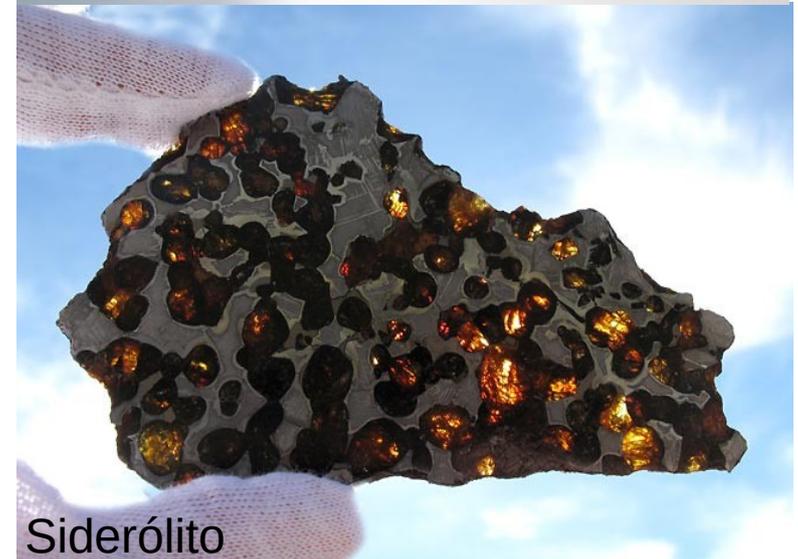
Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

Meteoritos

- **Ferrosos (sideritos)**, ~5 %, constituídos por **ligas metálicas** de **Fe** e **Ni**, com quantias secundárias de carbono, enxofre, e fósforo. Maioria parece ter se formado nos **núcleos** de **planetesimais** que estavam derretidos algum dia.
- **Ferrosos rochosos (siderólitos)**, ~1 %, constituídos por mistura de **minerais silicáticos** e **liga metálica (Fe + Ni)**. Parcialmente formados nas zonas de **fronteira** entre os **núcleos** e **crostas** de **planetesimais**.



Siderito

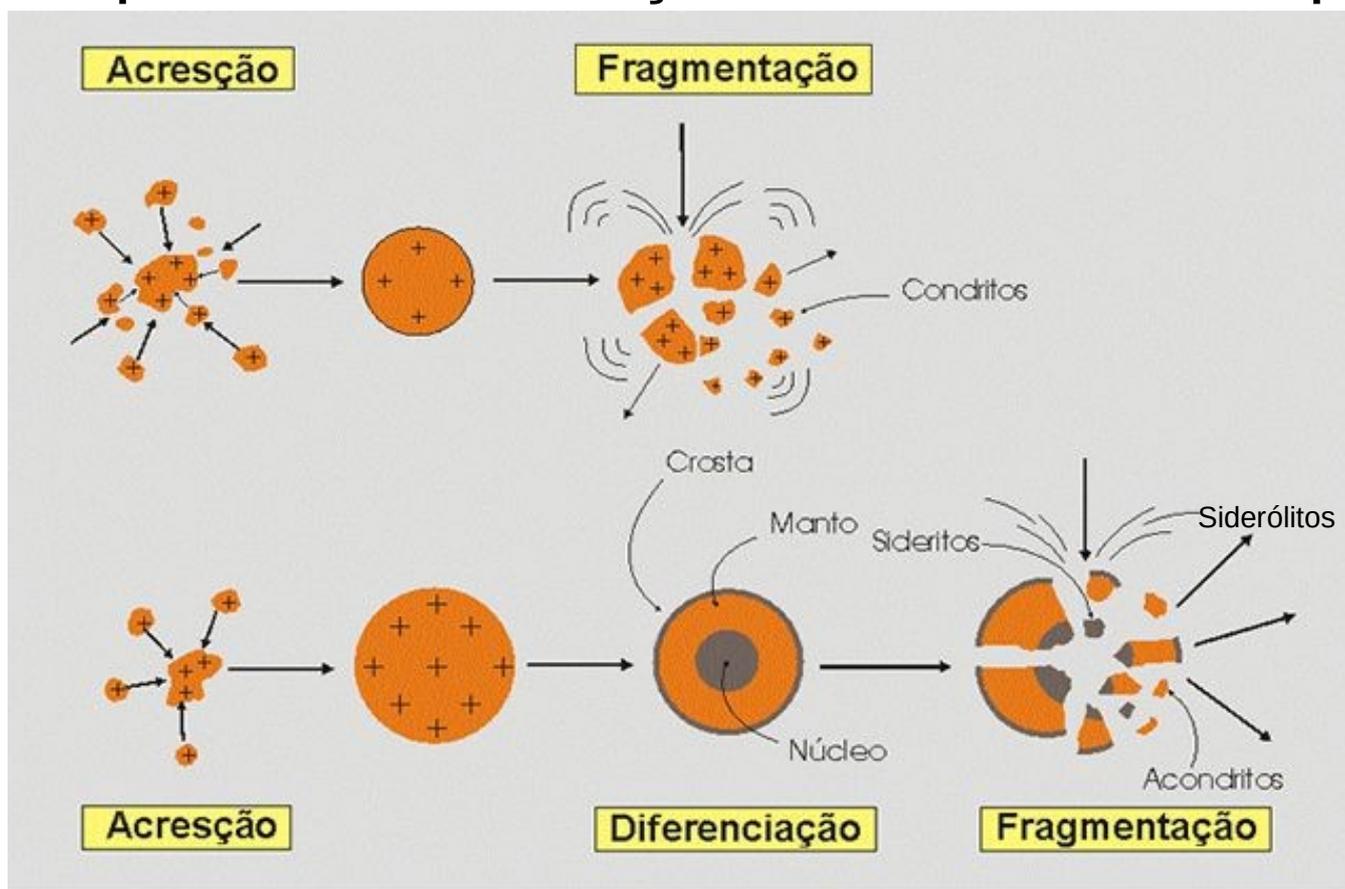


Siderólito

Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

Meteoritos

Esquema da formação dos diferentes tipos de meteoritos.



Esquema simplificado da origem dos meteoritos diferenciados e não diferenciados.

Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

Outro Esquema, mais bonito

Source: Smithsonian Museum of Natural History http://www.mnh.si.edu/earth/text/5_1_4_0.html

The diagram illustrates the internal structure of a meteorite, showing a cross-section with a bright yellow core, an orange mantle, and a grey crust. Dotted arrows point from the core, mantle, and crust to corresponding photographs of meteorite samples below. The samples are arranged in a row, with the first sample (Condrito) corresponding to the core, the second (Ferroso) to the mantle, and the third (Ferroso Rochoso) to the crust. The fourth sample (Acondrito) is shown separately. Below the samples are their respective labels and classifications.

| Condrito | Ferroso | Ferroso Rochoso | Acondrito |
|---------------------|---------|-----------------|-----------|
| Asteroide Tipo C | Tipo M | | Tipo S |

Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

Alguns Meteoritos conhecidos

O meteorito de **Bendegó**, um siderito, foi encontrado em 1784 perto do riacho do mesmo nome, na Bahia.

É o maior meteorito já encontrado no Brasil e o 16º maior do mundo.

Em 1888, foi pro Museu Nacional, no Rio de Janeiro e sobreviveu ao incêndio do museu de 02/09/2018.



Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

Alguns Meteoritos conhecidos

O meteorito de **Murchison**, um condrito carbonáceo, caiu em 1969 na Austrália.

Contém mais de 92 aminoácidos!

Em 2020, cosmoquímicos acharam nele material de 7 bi. anos, mais velho que o Sistema Solar!

Mais sobre ele na aula sobre astrobiologia.



Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

Alguns Meteoritos conhecidos

Na manhã do dia 15/02/2013, o dia naquele era esperada a passagem próxima de um asteroide, caiu, perto de **Челябинск** (Chelyabinsk), na Rússia, um meteorito de 17 a 20 metros de diâmetro e 11 mil toneladas, gerando uma onda de choque que feriu mais de 1200 pessoas e danificou centenas de residências.



A passagem esperado do outro asteróide, de 45 m de diâmetro, também aconteceu, mais tarde no mesmo dia.

Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

Alguns Meteoritos conhecidos

Várias pessoas filmaram o evento:

<https://www.youtube.com/watch?v=svzB0QYNIWI>

Um similar passou no dia

21/05/2019 sobre

Adelaide (Australia):

<https://www.youtube.com/watch?v=wcFVZrl4PQs>

E recentemente (08/05/2020) em Minas Gerais:

<https://www.youtube.com/watch?v=hiO2W3vTTOE>



Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

Alguns Meteoritos conhecidos

O evento de **Тунгуска** (Tunguska) na Sibéria (1908) era uma explosão gigantesca (~mil vezes a da bomba de Hiroshima), que derrubou 80 milhões de árvores em uma área de 2150 mil km².



É o maior corpo celeste que já atingiu a Terra na história registrada.

Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

Alguns Meteoritos conhecidos

A teoria mais aceita sobre as causas das mudanças climáticas responsáveis pela **extinção Cretáceo-Paleogeno** (K-Pg, antigamente K-T), uns 65 milhões de anos atrás, naquela os dinossauros não avianos encontraram seu fim, é a do **impacto** de um **meteorito** de ~10 km de diâmetro, talvez em “colaboração” com erupções vulcânicas na Índia.

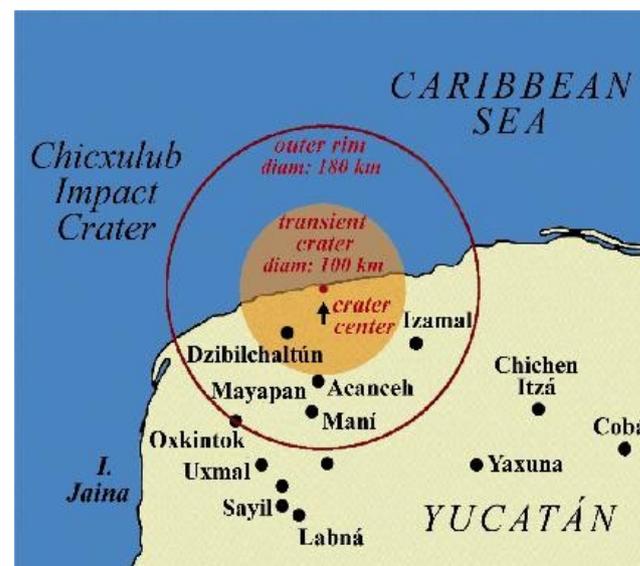


Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

Alguns Meteoritos conhecidos

A provável cratera deste impacto é a de Chicxulub, no México, cratera de 180 km de diâmetro descoberta em 1978.

Teorias, segundo aquelas a extinção do Permiano-Triássico ou extinção Permo-Triássica (~251 mio. anos atrás, matou uns 90 % a 95 % dos espécies existentes na época) também seja devida ao impacto de um meteorito, são tidas como **improváveis**, mas um meteorito pode ter colaborado.



A extinção do Permiano-Triássico

Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

A probabilidade para um Meteorito devastador

Near Earth Objects (NEO, objetos próximos à Terra; às vezes chamadas NEA, *Near Earth Asteroids*) são corpos celestes como **cometas** e **asteroides**, cujas órbitas se encontram **perto** da órbita do nosso planeta.

Um objeto é classificado como NEO quando, necessariamente, possuir periélio menor que 1.3 AU.

Dentre eles os *Potentially Hazardous Asteroids*, PHAs (asteróides potencialmente perigosos) são os que possuem maior risco de colidir com a Terra, devido às suas baixas distâncias de passagem pela órbita do planeta.

Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

A probabilidade para um Meteorito devastador

A **Escala de Torino** categoriza os NEO pelo **risco** de um **impacto** com a **Terra**, e pelos possíveis **danos** que eles causariam no caso do um tal impacto.



THE TORINO SCALE

Assessing Asteroid/Comet Impact Predictions

| | | |
|-----------------------------------|----|--|
| No Hazard | 0 | The likelihood of collision is zero, or is so low as to be effectively zero. Also applies to small objects such as meteors and bolides that burn up in the atmosphere as well as infrequent meteorite falls that rarely cause damage. |
| Normal | 1 | A routine discovery in which a pass near the Earth is predicted that poses no unusual level of danger. Current calculations show the chance of collision is extremely unlikely with no cause for public attention or public concern. New telescopic observations very likely will lead to re-assignment to Level 0. |
| Meriting Attention by Astronomers | 2 | A discovery, which may become routine with expanded searches, of an object making a somewhat close but not highly unusual pass near the Earth. While meriting attention by astronomers, there is no cause for public attention or public concern as an actual collision is very unlikely. New telescopic observations very likely will lead to re-assignment to Level 0. |
| | 3 | A close encounter, meriting attention by astronomers. Current calculations give a 1% or greater chance of collision capable of localized destruction. Most likely, new telescopic observations will lead to re-assignment to Level 0. Attention by the public and by public officials is merited if the encounter is less than a decade away. |
| | 4 | A close encounter, meriting attention by astronomers. Current calculations give a 1% or greater chance of collision capable of regional devastation. Most likely, new telescopic observations will lead to re-assignment to Level 0. Attention by the public and by public officials is merited if the encounter is less than a decade away. |
| Threatening | 5 | A close encounter posing a serious, but still uncertain threat of regional devastation. Critical attention by astronomers is needed to determine conclusively whether or not a collision will occur. If the encounter is less than a decade away, governmental contingency planning may be warranted. |
| | 6 | A close encounter by a large object posing a serious, but still uncertain threat of a global catastrophe. Critical attention by astronomers is needed to determine conclusively whether or not a collision will occur. If the encounter is less than three decades away, governmental contingency planning may be warranted. |
| | 7 | A very close encounter by a large object, which if occurring this century, poses an unprecedented but still uncertain threat of a global catastrophe. For such a threat in this century, international contingency planning is warranted, especially to determine urgently and conclusively whether or not a collision will occur. |
| Certain Collisions | 8 | A collision is certain, capable of causing localized destruction for an impact over land or possibly a tsunami if close offshore. Such events occur on average between once per 50 years and once per several 1000 years. |
| | 9 | A collision is certain, capable of causing unprecedented regional devastation for a land impact or the threat of a major tsunami for an ocean impact. Such events occur on average between once per 10,000 years and once per 100,000 years. |
| | 10 | A collision is certain, capable of causing a global climatic catastrophe that may threaten the future of civilization as we know it, whether impacting land or ocean. Such events occur on average once per 100,000 years, or less often. |

Fig. 2. Public description for the Torino Scale, revised from Binzel (2000) to better describe the attention or response that is merited for each category.

Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

A probabilidade para um Meteorito devastador

Uma tradução para um português pior que o meu.

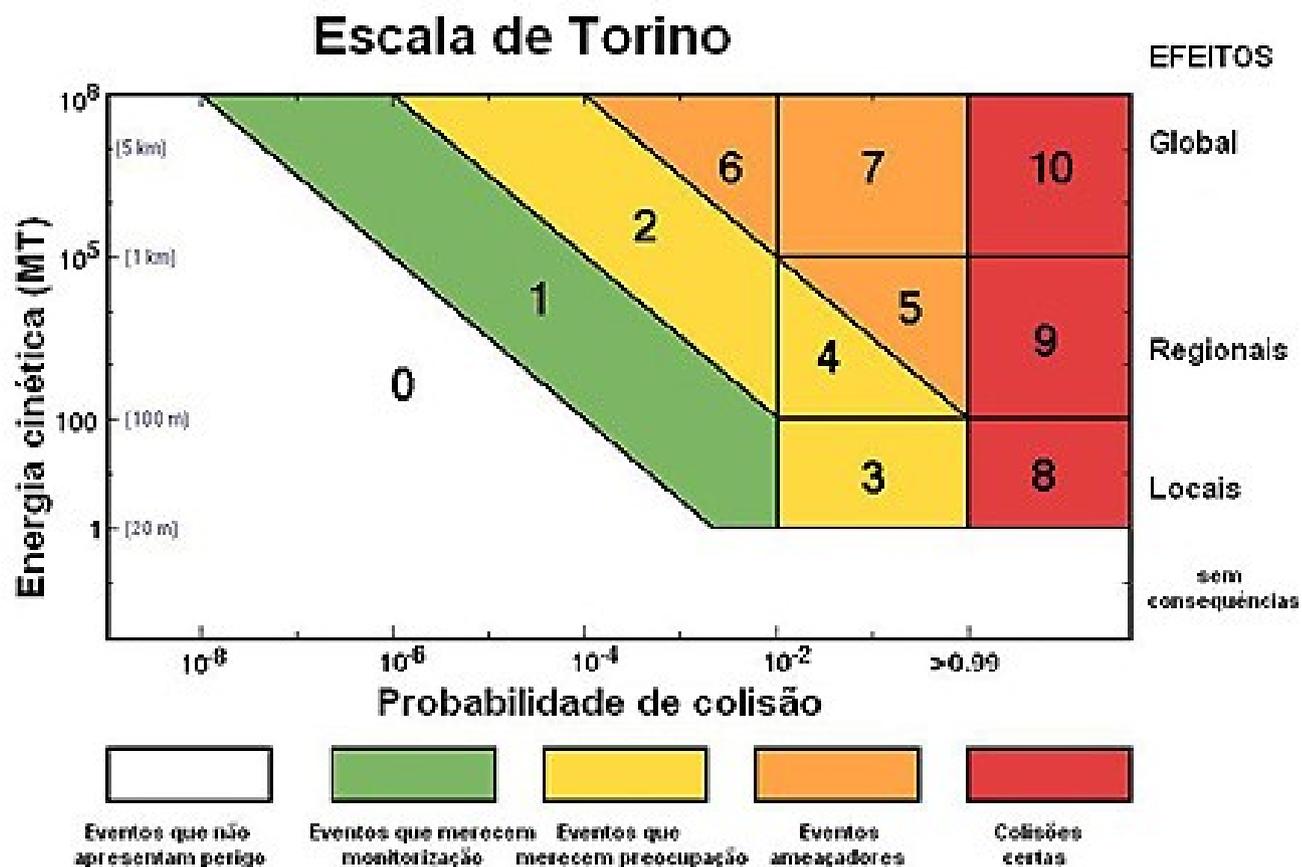


| | | |
|--|----|---|
| Tendo Não eventos prováveis conseqüências (White Zone) | 0 | A probabilidade de uma colisão é zero, ou bem abaixo da chance de que um objeto aleatório do mesmo tamanho vai atingir a Terra dentro das próximas décadas. Esta designação também se aplica a qualquer objeto pequeno que, em caso de uma colisão, é improvável que alcance a superfície da Terra intacta. |
| Eventos que merecem cuidadosa monitorização (Green Zone) | 1 | A chance de colisão é extremamente improvável, quase o mesmo como um objeto aleatório do mesmo tamanho colidir com a Terra dentro das próximas décadas. |
| Preocupação eventos que merecem (Zona Amarela) | 2 | Um encontro um pouco perto, mas não incomum. Colisão é muito improvável. |
| | 3 | Um encontro próximo, com 1% ou maior a chance de uma colisão capaz de causar destruição localizada. |
| Ameaçando Eventos (Orange Zone) | 4 | Um encontro próximo, com 1% ou maior a chance de uma colisão capaz de causar devastação regional. |
| | 5 | Um encontro próximo, com uma ameaça significativa de uma colisão capaz de causar devastação regional. |
| | 6 | Um encontro próximo, com uma ameaça significativa de uma colisão capaz de causar uma catástrofe global. |
| Colisões certos (Red Zone) | 7 | Um encontro próximo, com uma ameaça extremamente significativa de uma colisão capaz de causar uma catástrofe global. |
| | 8 | Uma colisão capaz de causar destruição localizada. Tais eventos ocorrem em algum lugar na Terra entre uma vez por 50 anos e uma vez por 1000 anos. |
| | 9 | Uma colisão capaz de causar devastação regional. Tais eventos ocorrem entre uma vez por 1.000 anos e uma vez por 100.000 anos. |
| | 10 | Uma colisão capaz de causar uma catástrofe climática global. Tais eventos ocorrem uma vez por 100 mil anos, ou menos frequentemente. |

Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

A probabilidade para um Meteorito devastador

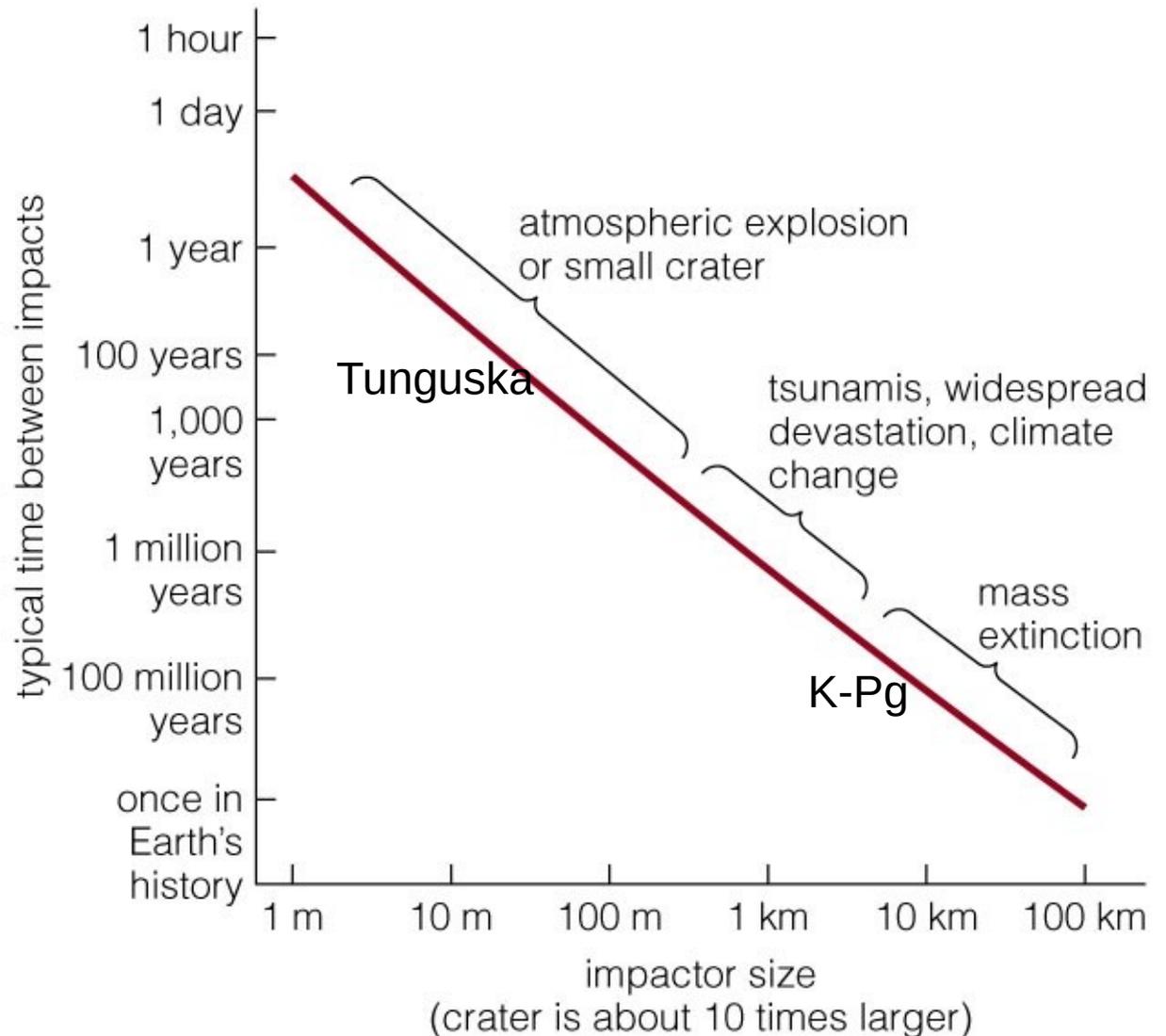
A **classificação** de um NEO na **escala de Torino** depende da maneira ilustrada nesta figura da **probabilidade** de **colisão** e do/a **tamanho / energia cinética** do corpo.



Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

A probabilidade para um Meteorito devastador

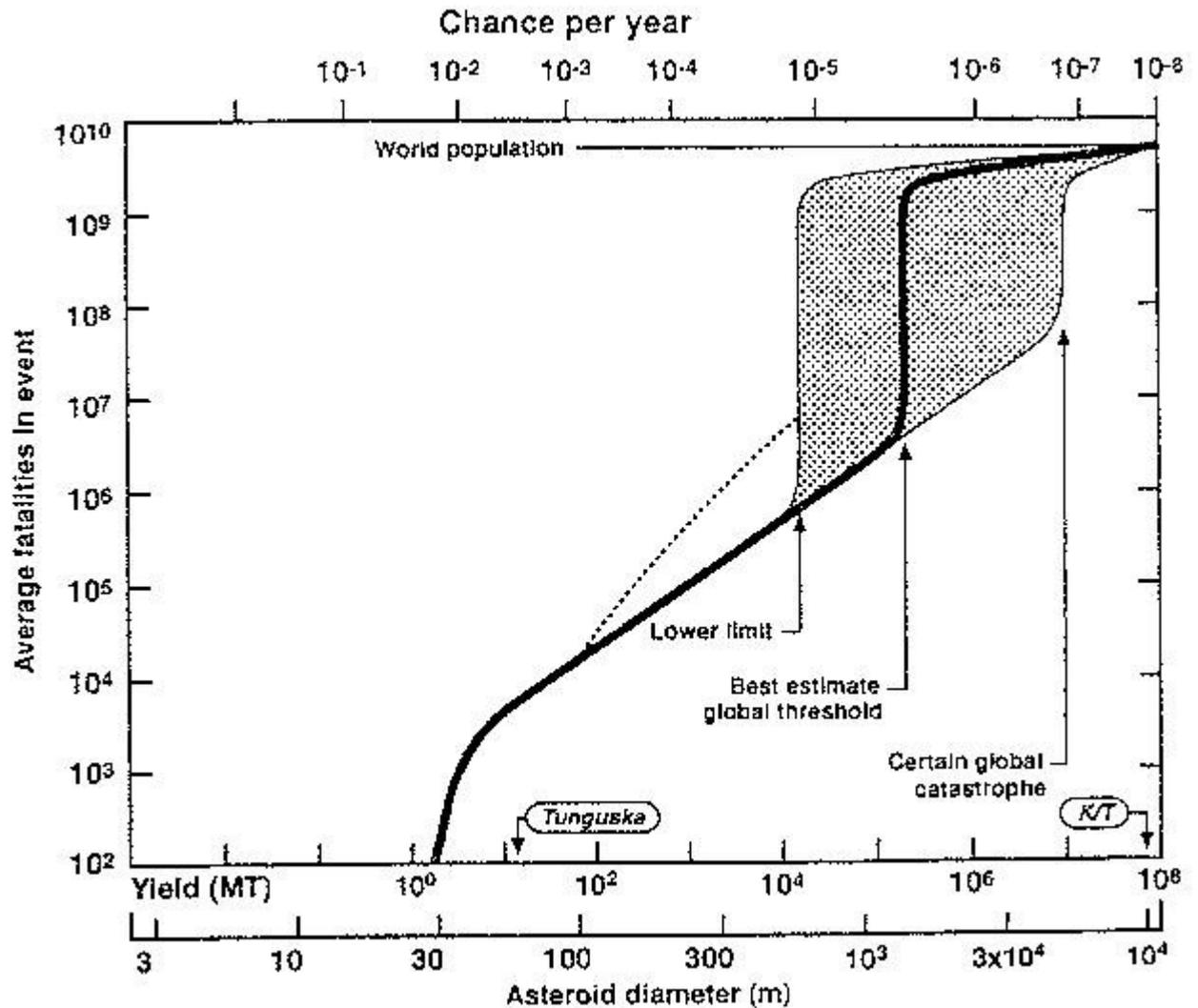
Também fizeram estimativas da **frequência** de impactos em função do **tamanho** do impactor.



Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

A probabilidade para um Meteorito devastador

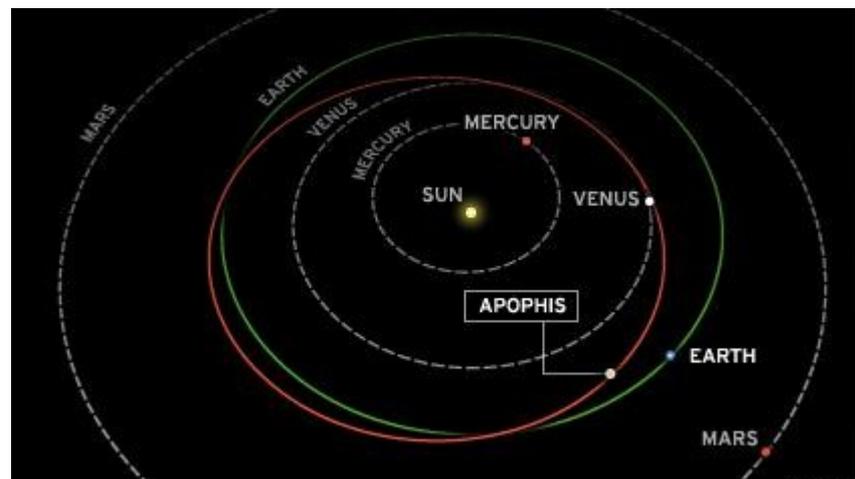
... e do número de **fatalidades** em função de **tamanho**, da **energia** de impacto, respectivamente da **probabilidade** de impacto **por ano** ...



Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

A probabilidade para um Meteorito devastador

Um NEO que está mais ou menos em rota de colisão com a Terra é **Apophis**, de ~350 m de diâmetro, que poderia colidir conosco em **2036**, causando **tsunamis** e/ou **mudanças climáticas** e **milhões de mortos**.



A órbita de Apophis

MSNBC

Quando descoberto, o asteroide era um no. 4 na escala de Torino (~1 % de risco de colisão), recorde até hoje.

Felizmente, desde então, a órbita foi determinada com melhor precisão, e o risco de colisão baixou para **menos** que **1 : 1 000 000**, tornando Apophis um no. **0**.

Meteoroides, Meteoros e Meteoritos

A probabilidade para um Meteorito devastador

Os projetos da ESA
Test-Bed Telescope
(TBT, 2 telescópios,
no Chile e na Espanha,
desde 2021)
e *Flyeye* (vários telescópios,
a partir de ~2030)
visam descobrir e monitorar
NEOs com diâmetros
acima de 40 m.



Telescópio TBT em la Silla, Chile



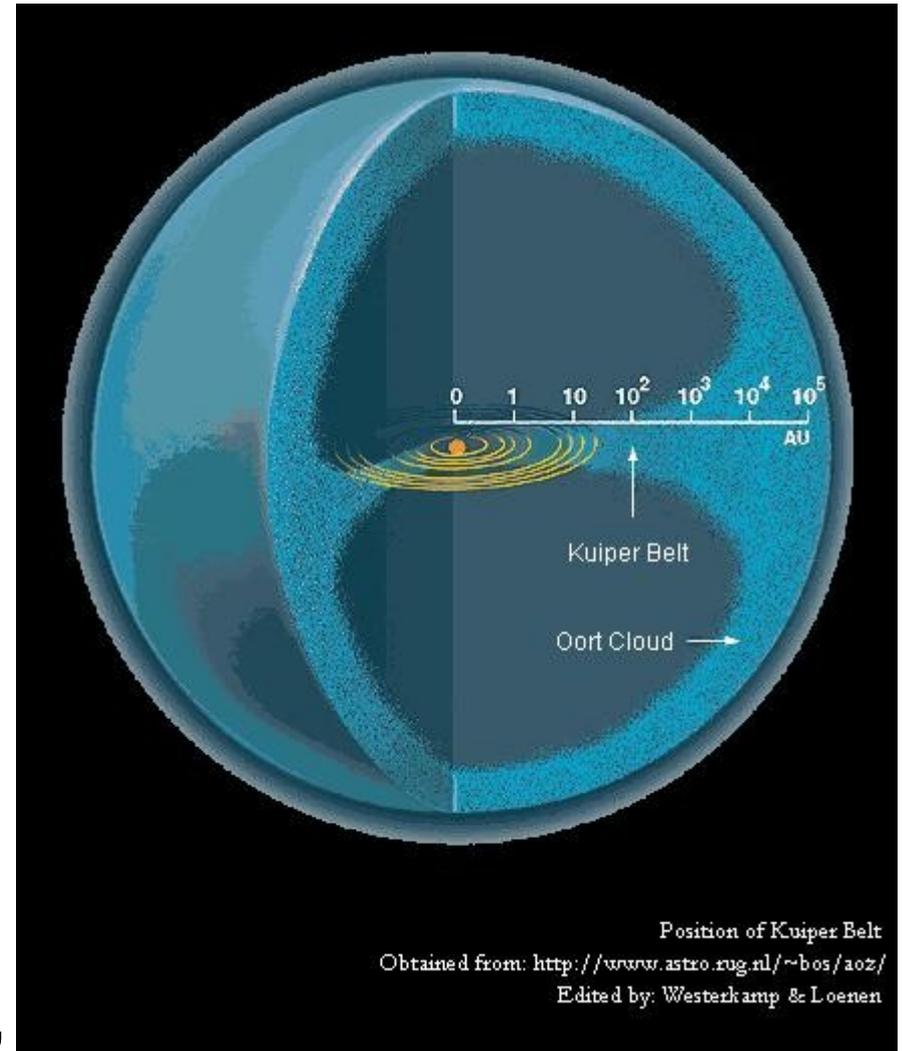
Telescópio Flyeye (impressão artística)

Objetos Transnetunianos

Corpos **gelosos** com **órbitas além** de **Netuno**.

Distribuídos em 2 regiões:

- A **Cintura de Kuiper**, de 30 a 100 AU do Sol, onde se encontram os **objetos da Cintura de Kuiper clássicos**, e originam os **cometas de curto período**.
- A hipotética **Nuvem de Oort**, entre 300 e 100 000 AU do Sol, repositório de **cometas de longo período**.
Contém 10^{12} - 10^{13} objetos, massa total $\sim 100 M_{\oplus}$



Plutão

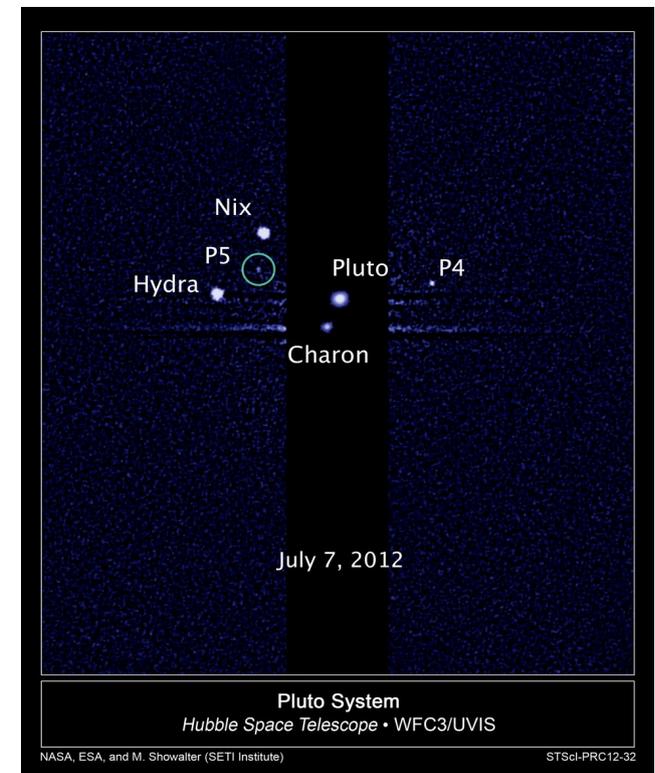
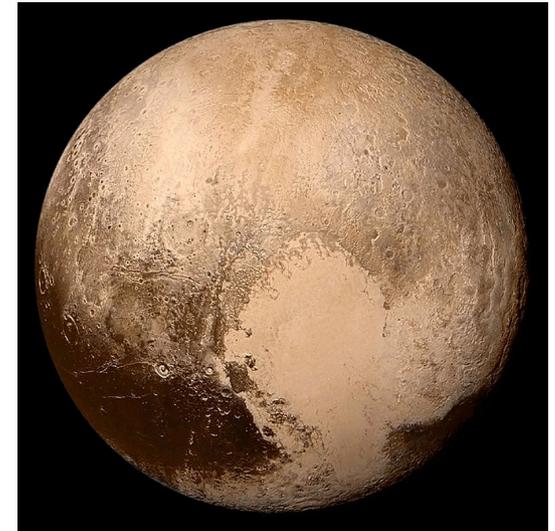
Símbolo ♇, Deus do Submundo
Descoberto em 1930 por Clyde Tom-
baugh na procura por um nono planeta.

=> Foi batizado o **nono planeta**.

- Semi-eixo maior da órbita: 39.5 AU
- Período orbital: 246 anos terrestres
= 1.5 anos netunianos
- Período rotacional: 6.4 dias terr.
retrógrada

Foram encontrados **5 satélites naturais** (luas) de Plutão:

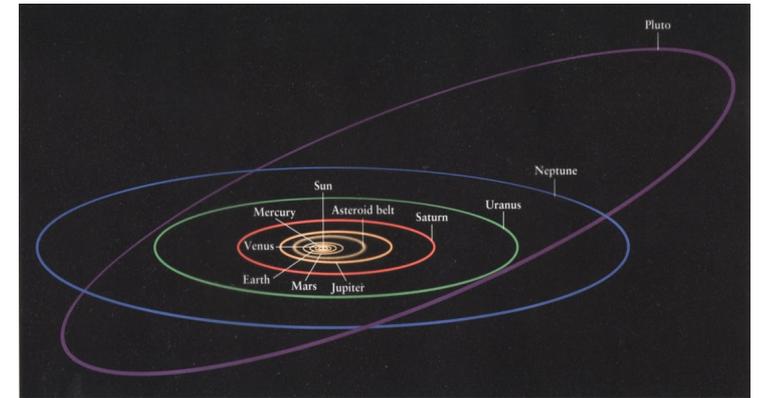
Caronte (*Charon*), Nix, Hidra (*Hydra*),
Cérbero (*Kerberos*), Estige (*Styx*)



Plutão

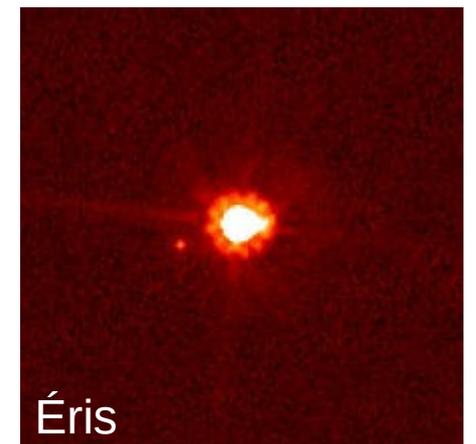
Porém, Plutão tem **muitas propriedades não** muito **típicas** para um **planeta**:

- **Órbita** muito mais **inclinada**, 17° com a eclíptica, e **elíptica**, $e = 0.25$, que as dos outros planetas, e que cruza a órbita de Netuno, em ressonância 3:2 com o período orbital de Netuno.



- **Raio** e **massa baixos** de $0.18 R_{\oplus}$ e $0.002 M_{\oplus}$
- **Composição** química similar a **TNOs** e a **Tritão**, mas **não** aos **planetas**.

Em 2005 foi descoberto um TNO **maior** que Plutão, Éris. => Conflito



Plutão

Em reação, 2006, a União Astronômica Internacional (IAU) estabeleceu **3 critérios formais** para **planetas**:

1. **Orbitar** uma **estrela**, i. e. o Sol.
2. Massa alta o suficiente para ter **forma esférica** pela gravitação própria.
3. Ter **esvaziado** a **vizinhança** da **órbita**.
Melhor seria “dominar a órbita”, já que nem Júpiter esvaziou a dela (Troianos).

Plutão não satisfaz critério 3:

=> Reclassificado junto com Éris e Ceres para **planeta anão**,
ou **plutóide** (objeto que satisfaz 1 e 2, mas não 3),
ou **objeto transnetuniano** ou **objeto da Cintura de Kuiper**.

Plutinos são TNOs em ressonância 3:2 com Netuno.

Objetos Transnetunianos

Os maiores Objetos Transnetunios conhecidos



Aparentemente, Haumea tem um anel, descoberto em 2017

Cometas

Pequenos **TNOs** compostos por **gelo** (água, metano, amônia e dióxido de carbono), **poeira**, às vezes material orgânico e/ou um núcleo rochoso,
=> “Bolas de gelo sujo”,
que se aventuram no **Sistema Solar interior**.

Apresentam **caudas** de até 1 AU de comprimento quando passam pelo Sistema Solar interior.

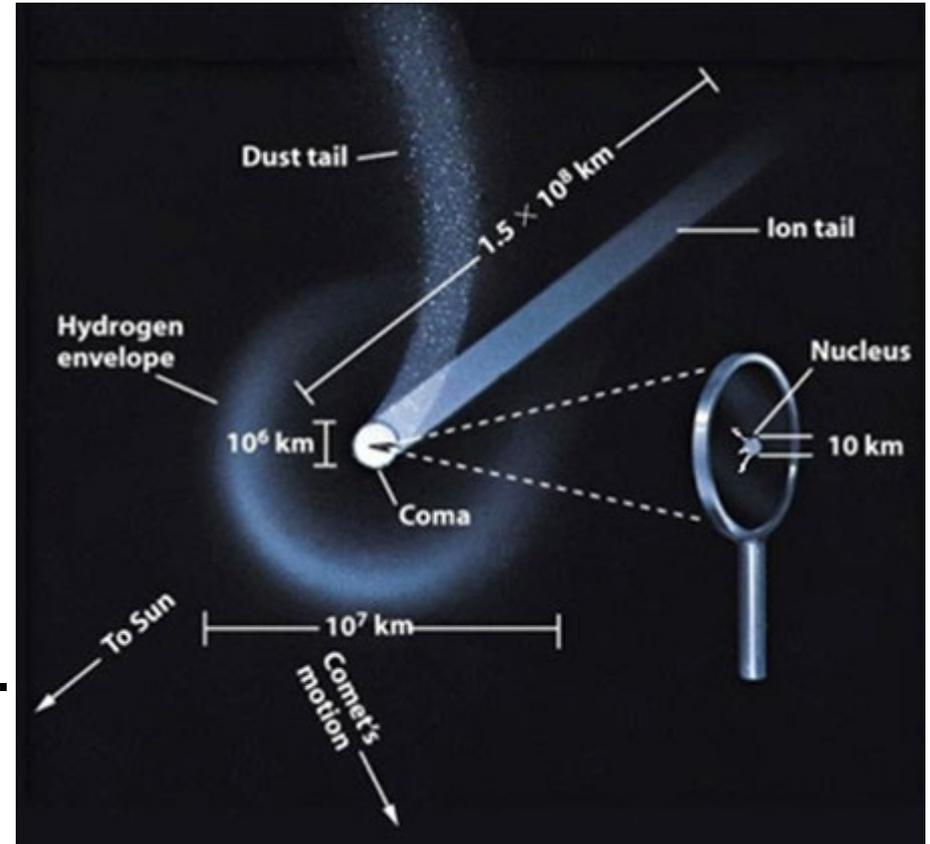


Cometas

Quando o cometa se **aproxima** do **Sol** (< 5 AU), o gelo **sublima**, formando um **coma** de gás evaporado e poeira em torno do **núcleo** sólido.

Ainda se forma um **halo** de **hidrogênio** em torno do coma.

O **gás** é parcialmente **ionizado** pela **radiação solar**.



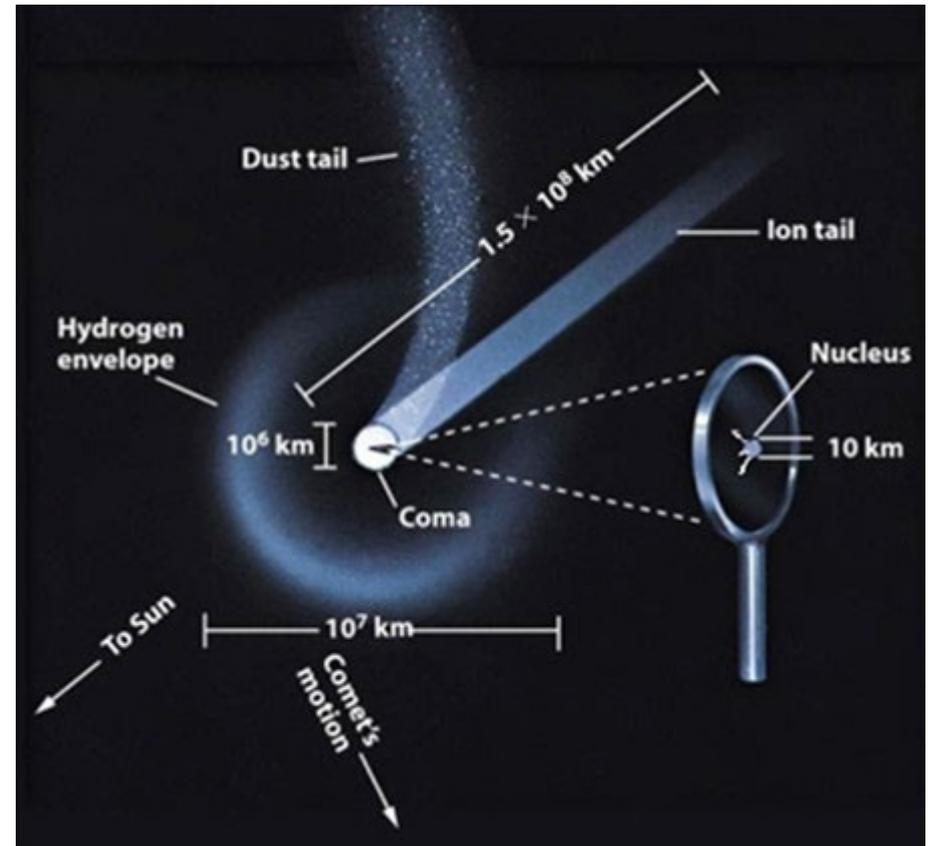
Cometas

A **pressão** da **radiação** do **vento solar empurra** a **poeira** para longe do Sol, formando a **cauda** de **poeira**.

O vento solar e o campo magnético do Sol empurram o **gás ionizado** para longe, formando a **cauda** de **íons**.

=> A(s) cauda(s) está(o) sempre **voltada(s)** para o **lado contrário** do **Sol**.

Quando o cometa sai da vizinhança do Sol, a cauda some (mas o cometa não, e pode voltar algum dia).



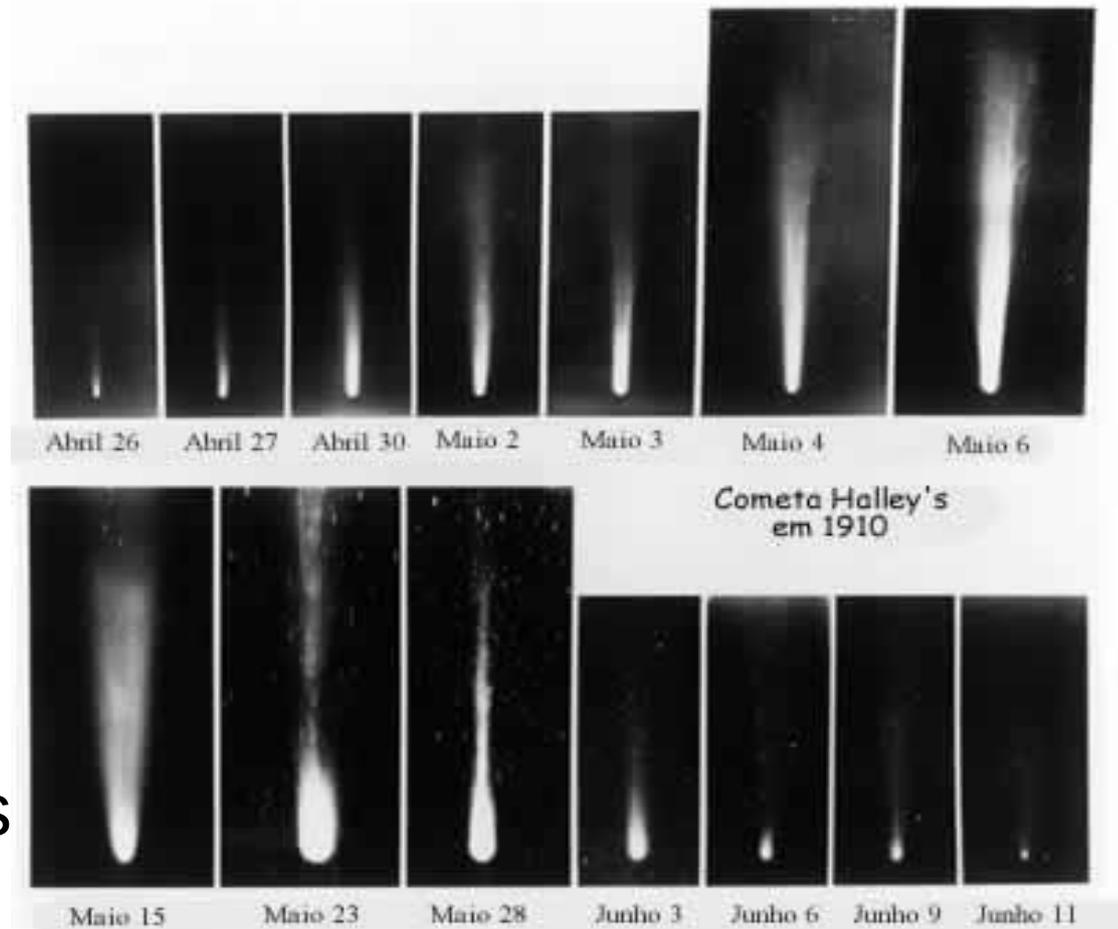
Cometas

Há **cometas periódicos**

- de **curto período** (< 200 anos) como Halley, que volta a cada 76 anos, vindos da **Cintura de Kuiper**.
- de **longo período** (> 200 anos, até mais de 1 mio. anos), vindos da **Nuvem de Oort**.

Há teorias, de que estes foram defletidos rumo Sol na passagem próxima deste e uma outra estrela.

e **não-periódicos**, indo para **fora do Sistema Solar**.



Cometas

No passado, cometas **colidiram** frequentemente com **planetas**, **luas** e **asteroides**.

=> Muitas **crateras** de impacto

Trouxeram pelo menos metade da **água** dos **oceanos** pra Terra (=> aula Astrobiologia).

A detecção de **moléculas orgânicas** nos cometas levou a especulações de que cometas ou meteoritos podem ter trazido os **elementos precursores** da **vida** ou mesmo os primeiros elementos vivos para a **Terra**.

=> (neo)**panspermia** (=> aula Astrobiologia)

Cometas

Alguns dos cometas mais conhecidos

Hale-Bopp: 19 meses de visibilidade (recorde) a partir de 23/07/1995, muito brilhante por ser grande, só volta em 2400 anos



Swift-Tuttle: passou em 1862 e 1992, deixa uma trilha de detritos que causa a chuva de meteoros das Perseidas. Já foi suspeito de poder se chocar com a Terra algum dia



Cometas

Alguns dos cometas mais conhecidos

Hyakutake passou perto da Terra em 1996 e tinha uma das caudas mais compridas já observadas. Não volta por pelo menos 14 000 anos

Halley: Cometa periódico com período de 76 anos, seus detritos causam a chuva de meteoros das Orionidas. Volta em 2061

Shoemaker-Levy 9 é conhecido por ter se chocado com Júpiter, o que forneceu informações sobre a composição do planeta gigante



Hyakutake



Halley

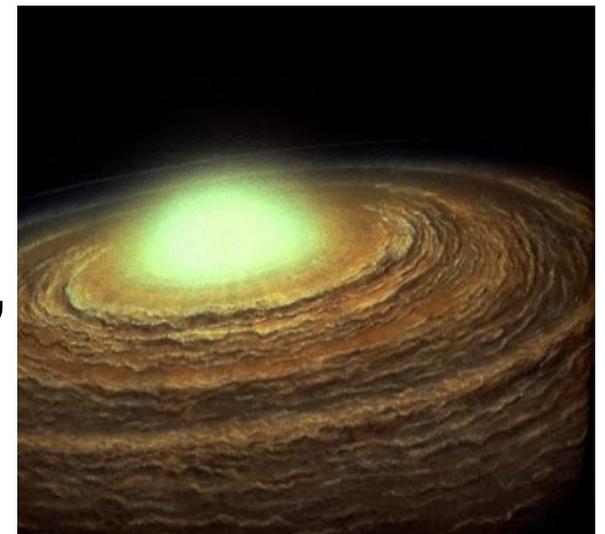


Shoemaker-Levy 9

Origem e Evolução do Sistema Solar

Hipótese Nebular

- Proposto já por **René Descartes** (1596-1650), **Immanuel Kant** (1724-1804) e o **Marquês de Laplace** (1749-1827): O **Sol** e os **planetas** se formaram **simultaneamente** da mesma nuvem de material, a **Nébulosa Solar**.
- Este material já continha uns 2 % de **elementos** mais **pesados** que H e He, formadas por estrelas que precediam o Sol (=> aula Estrelas).



Origem e Evolução do Sistema Solar

- **Colapso gravitacional** da **Nébulua Solar**
(datações de meteoritos: ~4.57 bio. anos atrás)

- **Momento angular** da nébula

=> **Disco de acreção**

(similar aos anéis de Saturno)

=> Explica, por que (quase) tudo no

Sistema Solar se encontra no

mesmo plano, a eclíptica, e gira

no **mesmo sentido**

(99 % do momento angular do SS está nos planetas, maior parte em Júpiter)

- **Calor** do **proto-Sol**:

=> **Gradiente de temperatura**

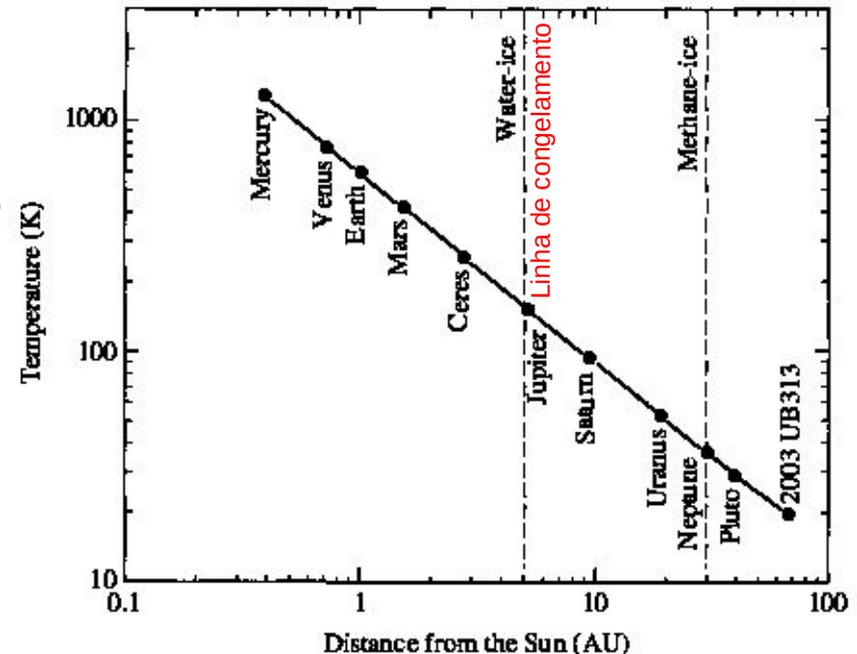
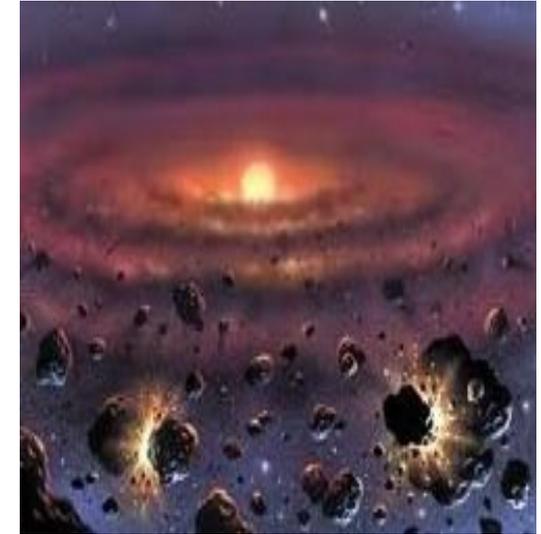
no disco protoplanetar



Origem e Evolução do Sistema Solar

- Formação de corpos de até ~1 km, os planetesimais, por forças de coesão a partir da poeira na nébula.
- Na parte interior do disco protoplanetar: Temperaturas altas, só material rochoso conseguiu condensar
=> poucos planetesimais, que eram rochosos
- Na parte exterior do disco: Temperaturas baixas, material rochoso e gelos podiam condensar
=> muitos planetesimais, rochosos e gelosos

A fronteira entre as duas regiões (a ~5 AU do Sol, onde $T \sim 150$ K) se chama linha de congelamento.



Origem e Evolução do Sistema Solar

Quando o Sol passou pelo estágio T Tauri*, ele expulsou o gás que sobrou para fora do proto Sistema Solar.

=> só sobraram planetesimais.

*Uma fase que ocorre na formação de estrelas, naquela surgem jatos e fortes ventos
=> Aula Formação Estelar



Origem e Evolução do Sistema Solar

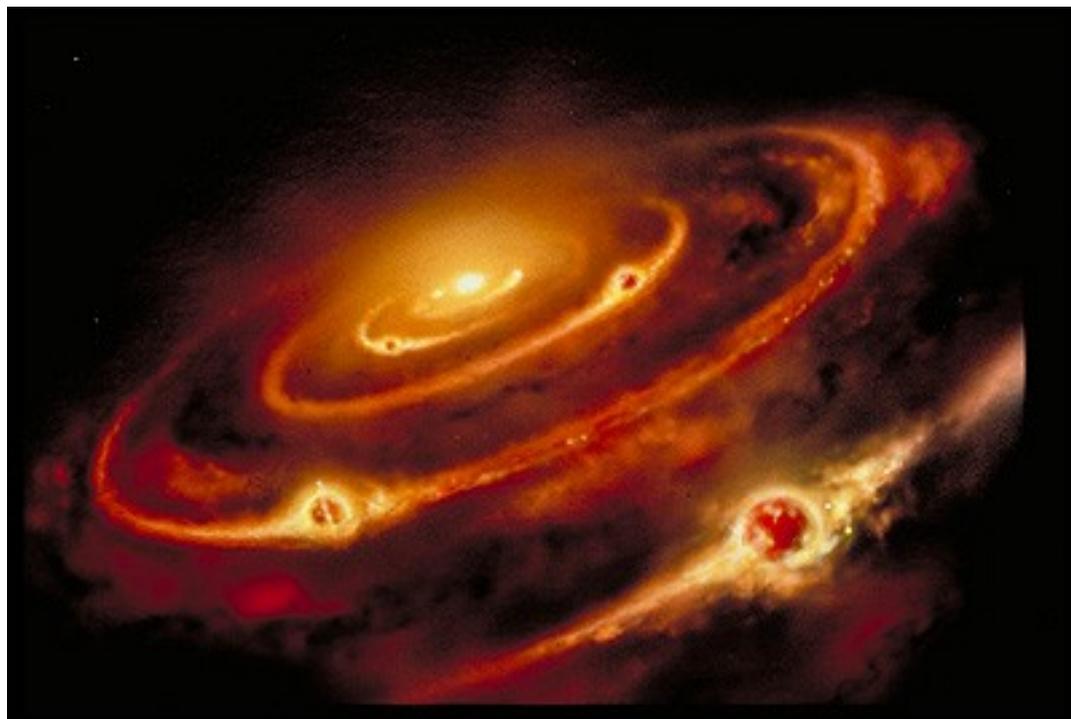
- Formação dos **protoplanetas** por **atração gravitacional** entre os planetesimais:
- Disco **interior**:
Protoplanetas **rochosos** de **massa não muito alta** (já que formados por poucos planetesimais)

=> **Não** conseguiram atrair e acumular **atmosferas**

(Estas foram formadas depois, talvez por vulcanismo, vento solar e/ou trazidas por planetesimais/cometas/asteróides)

=> **Planetas terrestres**

Neste período também ocorreram as **colisões** que resultaram na **Lua** terrestre e nas **inclinações** dos **eixos rotacionais** dos planetas, e tiraram o manto de Mercúrio.



Origem e Evolução do Sistema Solar

- Disco **exterior**:
protoplanetas **rochosos**
e gelosos de **massa alta**
=> Conseguiram atrair
e acumular **atmosfera**s,
=> Gigantes **gelosos**,
ou até **atmosfera**s **massivas**
=> Gigantes **gasosos**

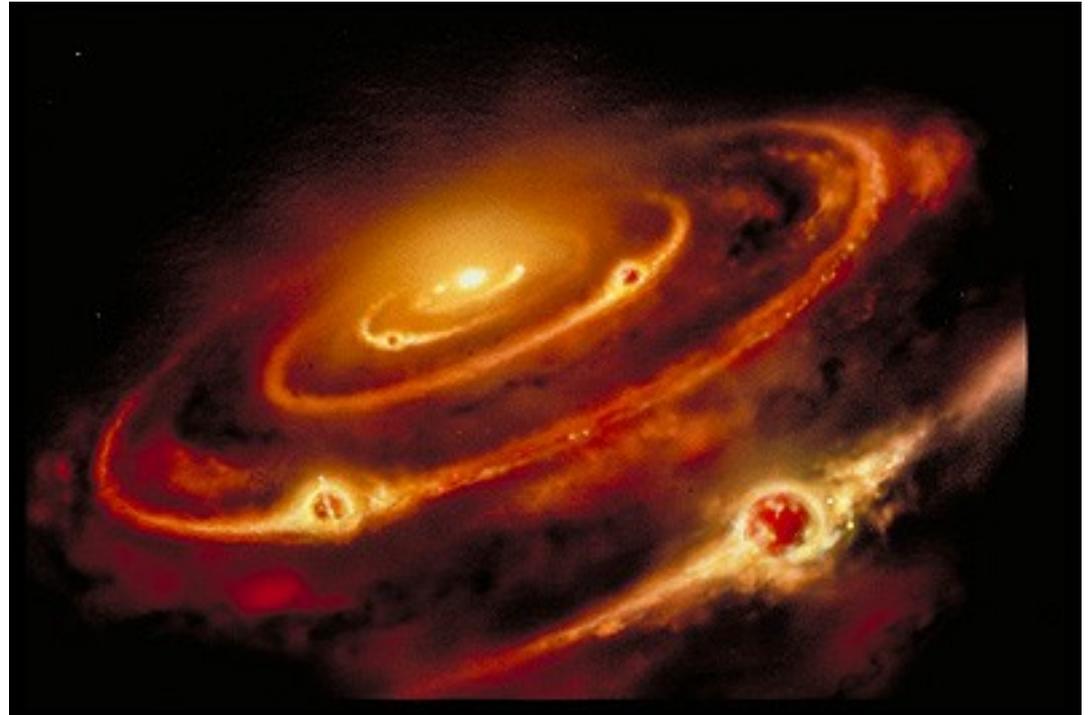
Em torno dos planetas
gigantes:

Formação de algumas das **luas** de maneira similar que os planetas em torno do Sol se formaram, em pequenos discos de acreção.

=> i. e. as **Luas Galileanas** de Júpiter

Como o disco era mais denso na região de Júpiter, foi este gigante que acabou acumulando a maior massa.

A formação de Júpiter e suas luas deve ter levado ~1 mio. anos.



Origem e Evolução do Sistema Solar

- **Entre** as duas regiões do disco protoplanetar, um pouco **dentro** da região da formação de **gelo**: Região, onde, pela baixa densidade e pela influência de Júpiter, os **planetesimais rochosos não** conseguiram formar um **planeta** grande, só **corpos menores** (pelos mesmos motivos, Marte conseguiu acumular menos material que Vênus e Terra).

=> **Cintura de Asteroides**

Quanto mais para o exterior, tanto mais gelo podia ser integrado nos asteroides

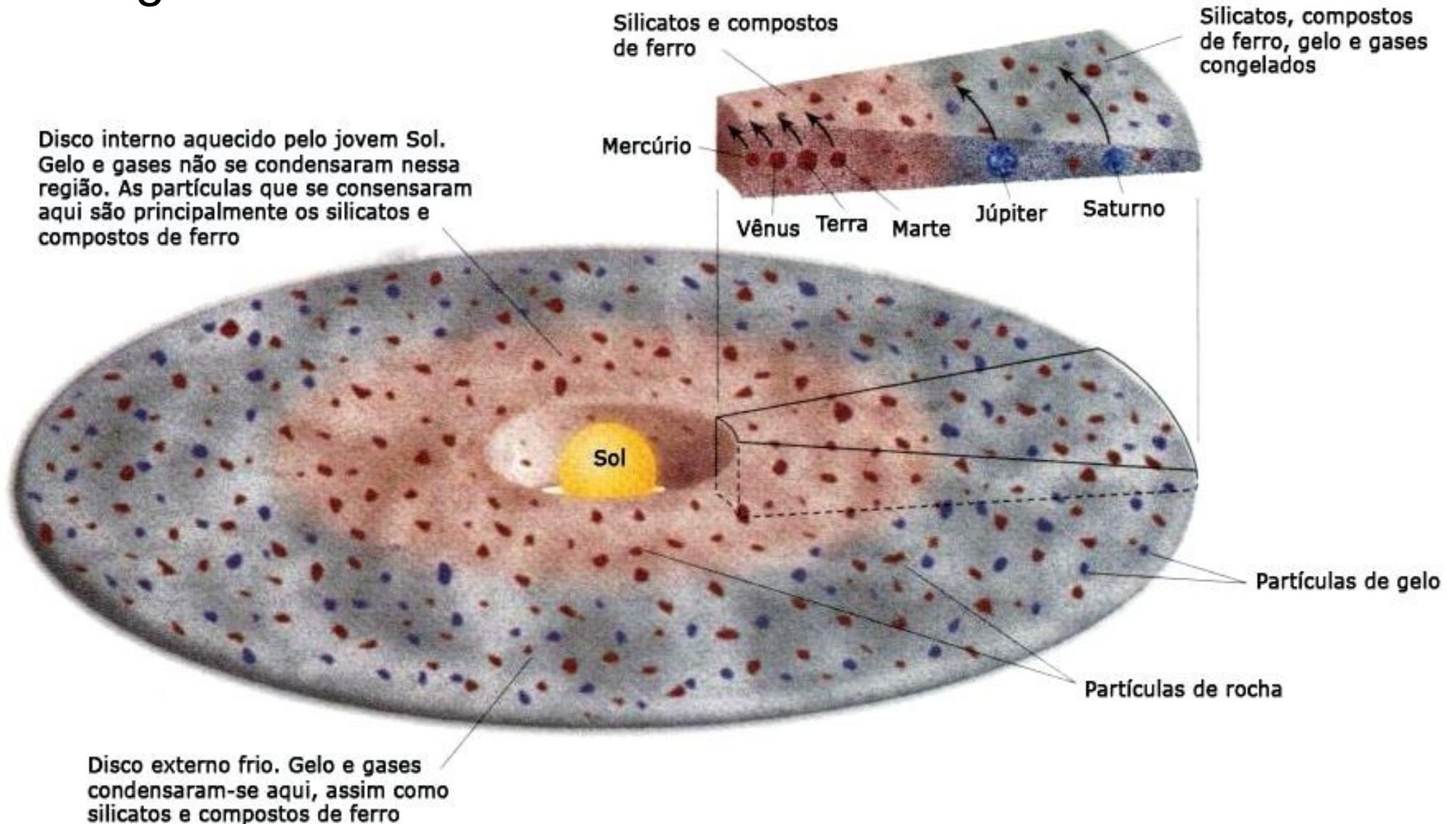
=> Explica as posições dos vários tipos de asteroides

- Mais pro **exterior** que os protoplanetas gigantes: **Densidade menor**, planetesimais **gelosos** também só conseguiram formar **corpos menores**

=> **Cintura de Kuiper**

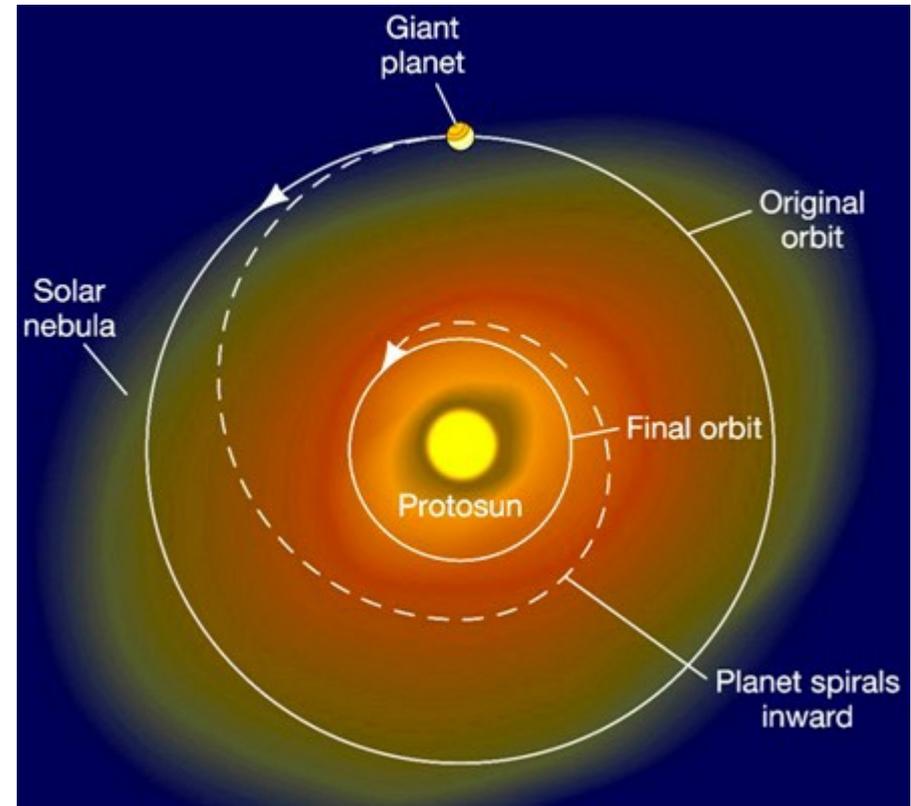
Origem e Evolução do Sistema Solar

Imagem ilustrando esta ideia



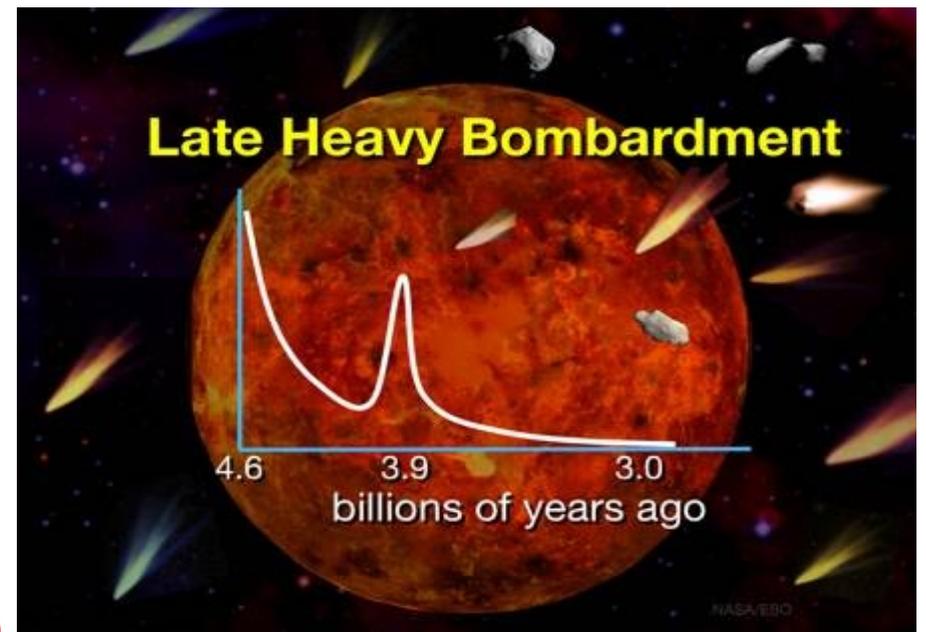
Origem e Evolução do Sistema Solar

- Por **interações** viscosas e de maré com o **disco de acreção** e com os **planetesimais**, **Júpiter migrou** mais para **dentro**, enquanto **Saturno**, **Urano** e **Netuno** migraram mais pro **exterior** do disco
- No caminho, os planetas gigantes **capturaram** alguns **planetesimais**, e **defletiram** outros, para **dentro** ou para **fora** do disco



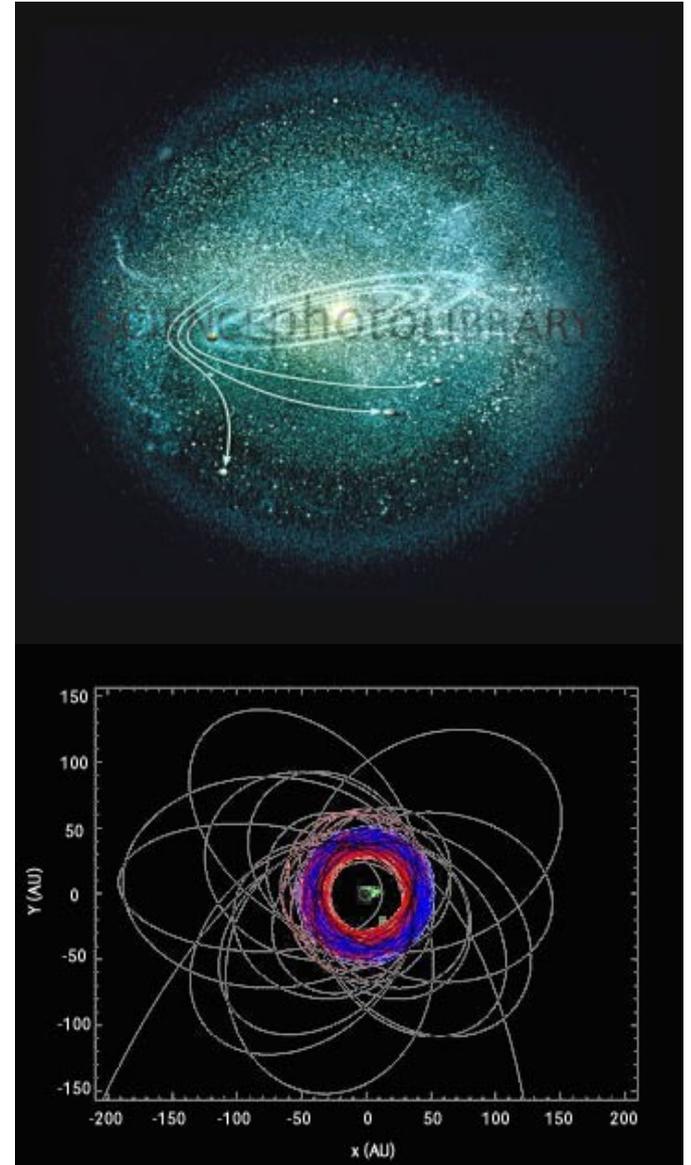
Origem e Evolução do Sistema Solar

- Os planetesimais **capturados** pelos planetas se tornaram **luas** menores
- Os defletidos para **dentro** caíram em cima dos planetas e luas recém-formados, causando **crateras** de impacto. Isto continua em escala menor **até hoje**, e deve ter sido particularmente intenso uns 700 mio. anos após a formação do Sistema Solar, quando **Júpiter** e **Saturno** passaram por uma **ressonância** de 1:2, causando os dois a “colaborarem”, **amplificando** as defleções.
=> **bombardeamento pesado**



Origem e Evolução do Sistema Solar

- Os defletidos para **fora** formaram a **Nuvem de Oort**, ou foram **expelidos** do Sistema Solar
- No caminho pra fora, **Netuno** ainda **capturou** alguns **objetos** da **Cintura de Kuiper** em **ressonâncias** orbitais 3:2, os **plutinos** atuais.





Universidade Federal do ABC

Noções de Astronomia e Cosmologia

FIM PRA HOJE

