

# Do Céu Caiu Uma Estrela

Nuno Peixinho

Centro de Física Computacional da Universidade de Coimbra  
Observatório Astronómico da Universidade de Coimbra



Departamento de Matemática  
Faculdade de Ciências e Tecnologia  
Universidade de Coimbra



Nilus: Origone / Bertrand Editores

# Olhemos a Lua

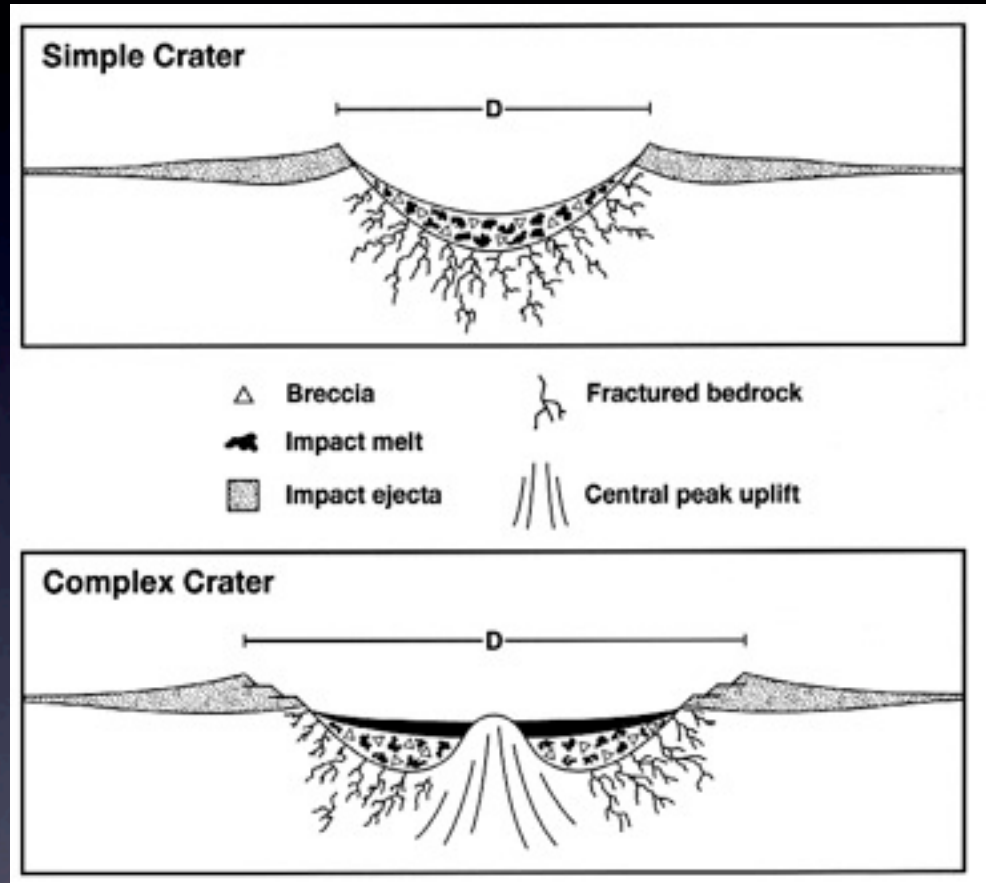
# Lua



- Olhando a Lua vemos que os impactos por pequenos corpos são ou foram frequentes.

# Que vemos?

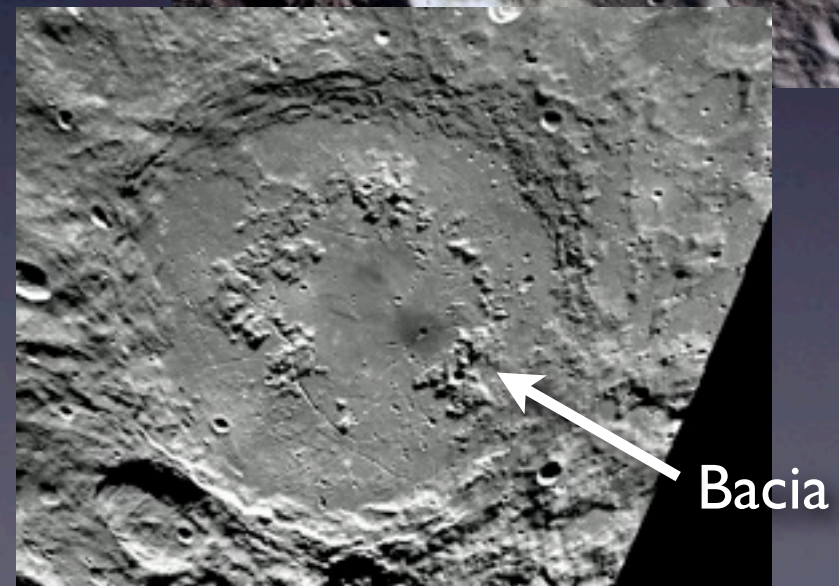
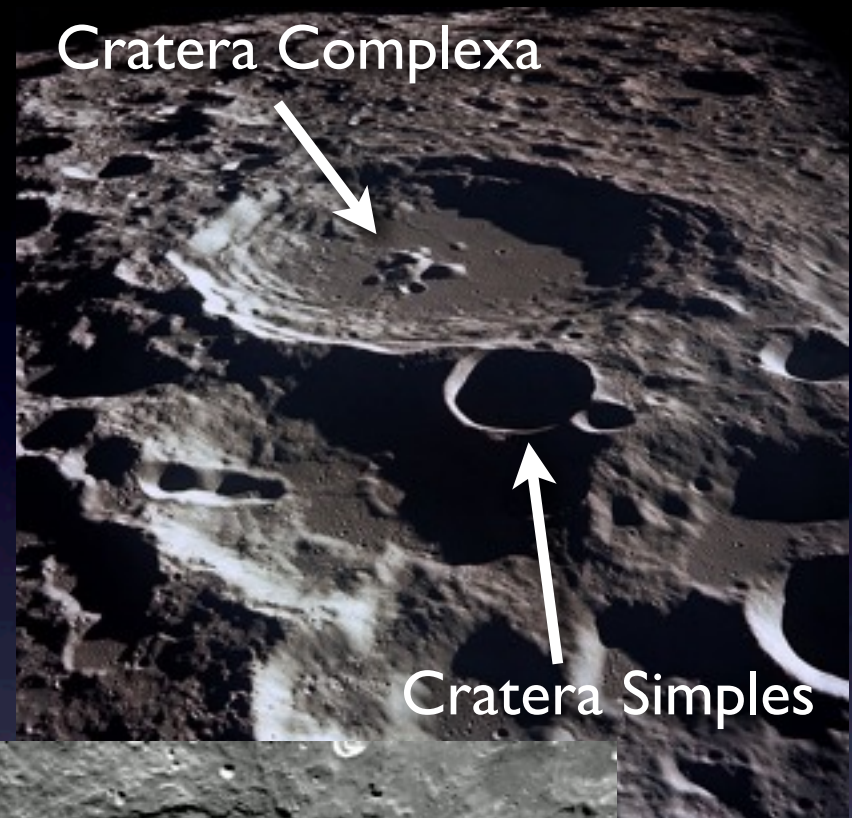
- Não há cones vulcânicos.
- Elevado número de crateras de impacto:
  - Crateras simples:  $D < 10-15$  km.
  - Crateras complexas:  $D > 10-15$  km.
  - Bacias:  $D > 200-300$  km.





## Que vemos?

- Não há cones vulcânicos.
- Elevado número de crateras de impacto:
  - Crateras simples:  $D < 10-15$  km.
  - Crateras complexas:  $D > 10-15$  km.
  - Bacias:  $D > 200-300$  km.



# E na Terra?



# Meteoróides e chuvas de estrelas

- Os cometas libertam poeiras durante as suas passagens. Essas poeiras quando entram na atmosfera da Terra criam as chuvas de estrelas.





# Meteoróides e chuvas de estrelas

- Os cometas libertam poeiras durante as suas passagens. Essas poeiras quando entram na atmosfera da Terra criam as chuvas de estrelas.



# A que velocidade andam?

- Os meteoros vêm a uma velocidade de 10 a 70 km/s.
- Num planeta/corpo sem atmosfera nada pára o meteoro antes deste embater no solo.

# A que velocidade andam?

- Os meteoros vêm a uma velocidade de 10 a 70 km/s.
- Num planeta/corpo sem atmosfera nada pára o meteoro antes deste embater no solo.

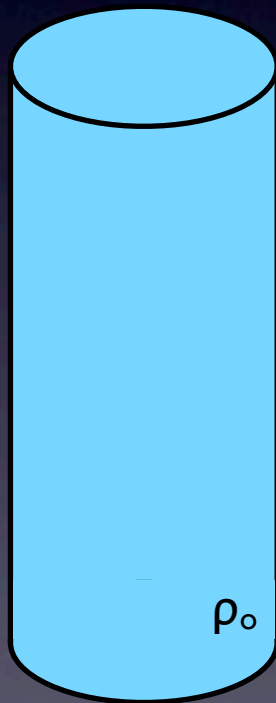
## Qual a energia de um meteoro?

- Energia de 1 kg a 30 km/s:  $E_c = 1/2 mv^2 = 450 \text{ Mega Joule}$
- Energia de 1 kg de TNT:  $E = 4.7 \text{ MJ}$
- Energia de 1 kg de dinamite:  $E = 7.5 \text{ MJ}$

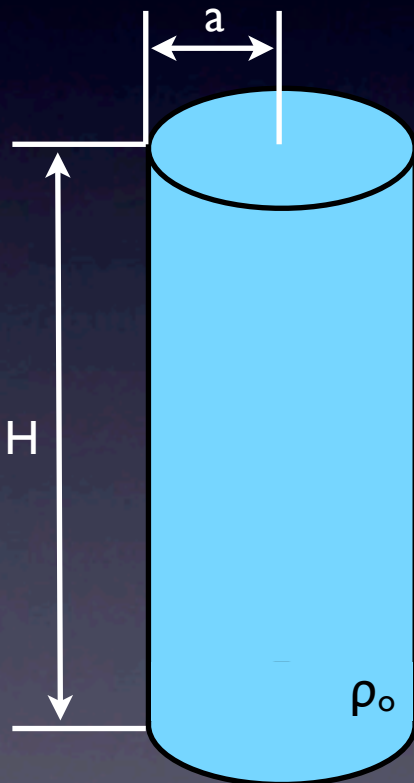


# Porque não nos afectam os pequenos objectos?

- Na Terra, a atmosfera cria um forte atrito aerodinâmico:
  - esse atrito tende a pará-los, pois perdem energia;
  - a forte pressão a que ficam sujeitos tende a fragmentá-los;
  - sendo supersónicos, a onda de choque aquece-os até 25000 °C vaporizando-os.
- Qual o tamanho do maior objecto que a atmosfera consegue “parar”?
  - Numa aproximação grosseira, quando a massa da coluna de ar da atmosfera é igual à massa do objecto.



$\rho_o$



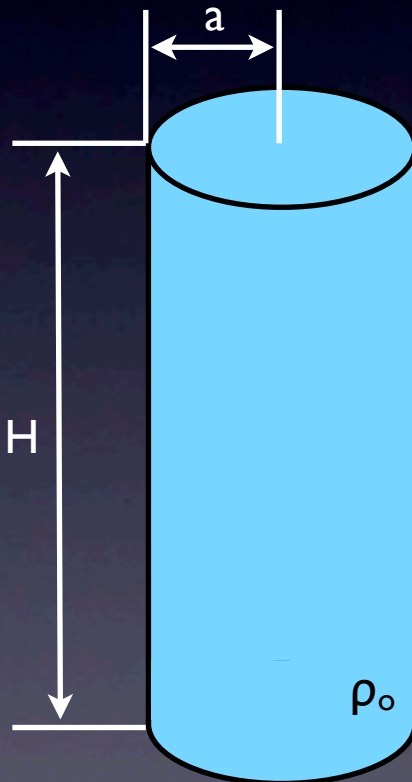
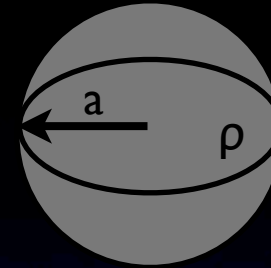
Volume da coluna de ar:  $V_{\text{ar}} = \pi a^2 H$

Massa da coluna de ar:  $M_{\text{ar}} = \pi a^2 H \rho_o$



Volume do meteoro:  $V_m = \frac{4}{3} \pi a^3$

Massa do meteoro:  $M_m = \frac{4}{3} \pi a^3 \rho$



Volume da coluna de ar:  $V_{ar} = \pi a^2 H$

Massa da coluna de ar:  $M_{ar} = \pi a^2 H \rho_o$

Então:

$$\pi a^2 \rho_o H \approx \frac{4}{3} \pi a^3 \rho$$

$$a \approx \rho_o H / \rho$$

Se para a Terra:

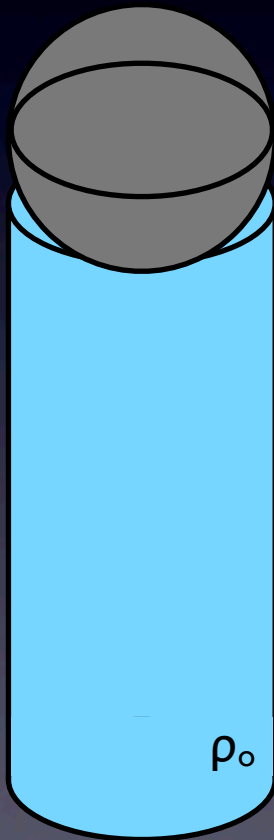
$$H = 10 \text{ km (espessura da atmosfera)}$$

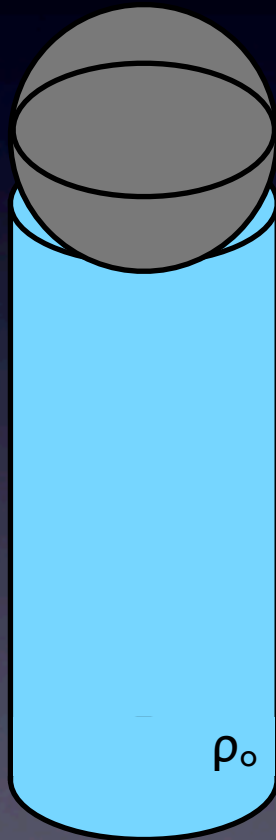
$$\rho_o = 1 \text{ kg/m}^3 \text{ (densidade do ar)}$$

e para o meteoro:

$$\rho = 3000 \text{ kg/m}^3 \text{ (densidade de rocha)}$$

$$\text{Temos: } a \approx 3 \text{ m}$$





A atmosfera da Terra protege-nos dos meteoros de alguns metros de diâmetro.



# Que acontece se o objecto for maior?

- Felizmente a pressão do ar sobre o objecto é tão forte que o pode fragmentar.
- Tipicamente, apenas objectos maiores que 30-50 m conseguirão atingir o solo com grande estrago.

# Que acontece se o objecto for maior?

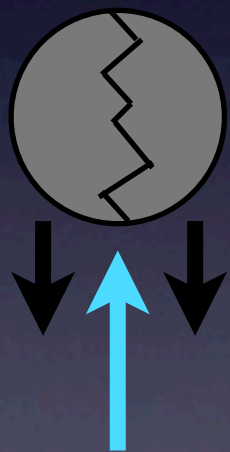
- Felizmente a pressão do ar sobre o objecto é tão forte que o pode fragmentar.
- Tipicamente, apenas objectos maiores que 30-50 m conseguirão atingir o solo com grande estrago.

## Mas... e se for ainda maior?

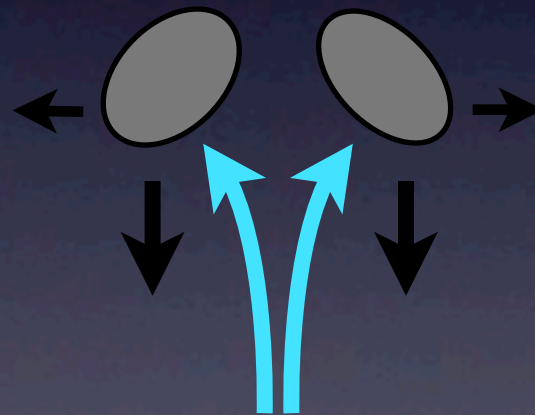
- Bom... esperemos que caia nos Estados Unidos, como todos os filmes indicam.

# Que acontece se o objecto for maior?

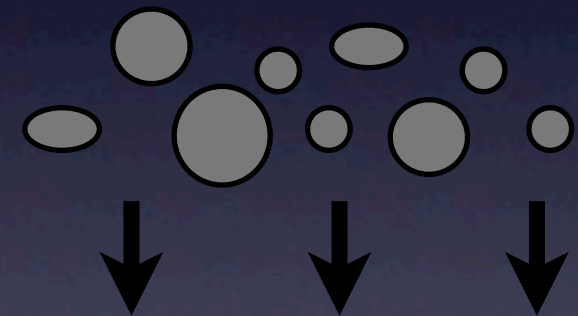
- Felizmente a pressão do ar sobre o objecto é tão forte que o pode fragmentar.
- Tipicamente, apenas objectos maiores que 30-50 m conseguirão atingir o solo ainda inteiros causando grandes estragos.



Fragmentação  
pela força de  
pressão



Afastamento



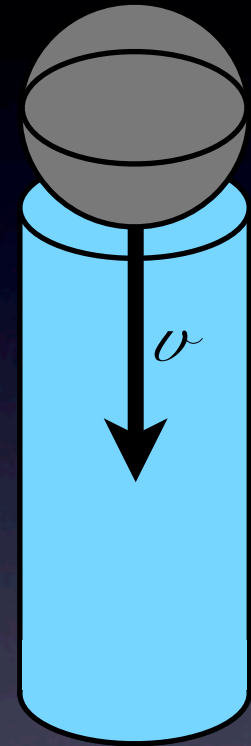
Formação de Panqueca



# Como se fragmentam? (I)

- O meteoro intercepta uma certa massa de ar à taxa temporal de:

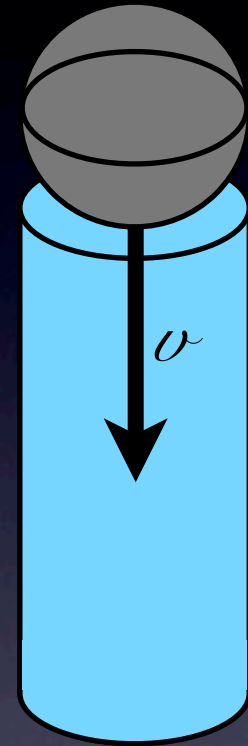
$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{dm}{dt} = \pi a^2 \rho v$$



# Como se fragmentam? (I)

- O meteoro intercepta uma certa massa de ar à taxa temporal de:

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{dm}{dt} = \pi a^2 \rho v$$



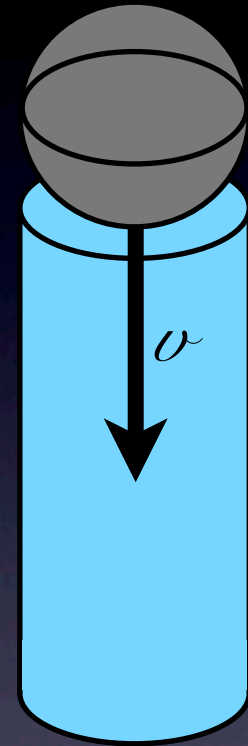
- A força a que está sujeito é a variação do momento por unidade de tempo:

$$\frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{\Delta(mv)}{\Delta t} = m \frac{dv}{dt} + v \frac{dm}{dt} = \pi a^2 \rho v v = \pi a^2 \rho v^2$$

# Como se fragmentam? (II)

- Essa força leva a uma pressão (aero)dinâmica:

$$P_{ram} = \frac{F}{A} = \frac{\pi a^2 \rho v^2}{\pi a^2} = \rho v^2$$



# Como se fragmentam? (II)

- Essa força leva a uma pressão (aero)dinâmica:

$$P_{ram} = \frac{F}{A} = \frac{\pi a^2 \rho v^2}{\pi a^2} = \rho v^2$$

- Exemplos:

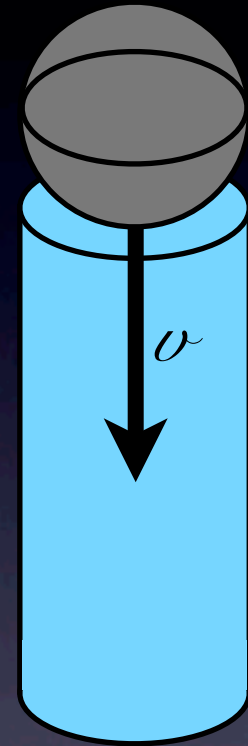
Bola de futebol:

$$P_{ram} \approx 1 \text{ kg/m}^3 \times 40 \text{ km/h} \approx 1 \text{ kg/m}^3 \times 10 \text{ m/s} = 100 \text{ N/m}^2$$

Impacto cósmico:

$$P_{ram} \approx 1 \text{ kg/m}^3 \times 35000 \text{ km/h} \approx 1 \text{ kg/m}^3 \times 10000 \text{ m/s} = 1000 \text{ bar}$$

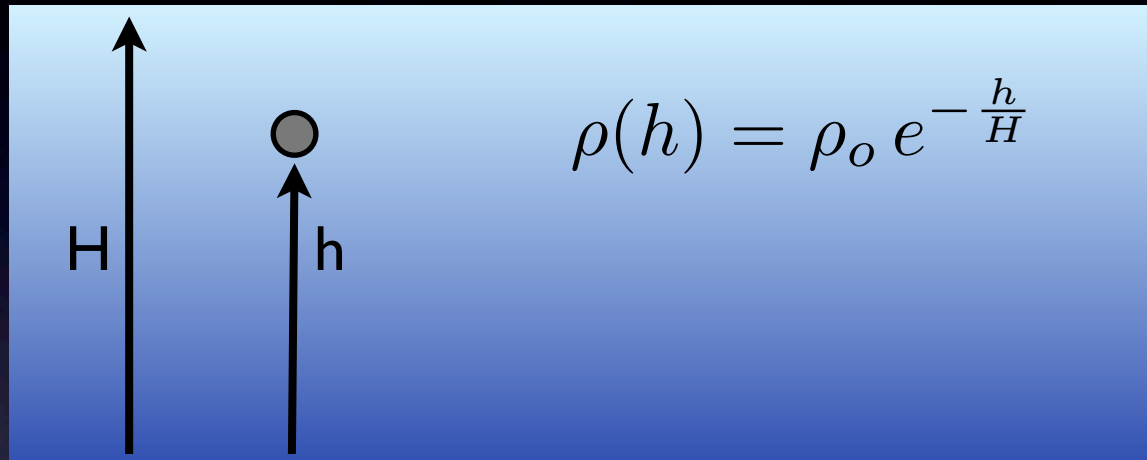
- Se a pressão for maior que a força de coesão, o meteoro parte-se.





# A que altura se fragmentam? (I)

- A densidade da atmosfera diminui com a altitude segundo:

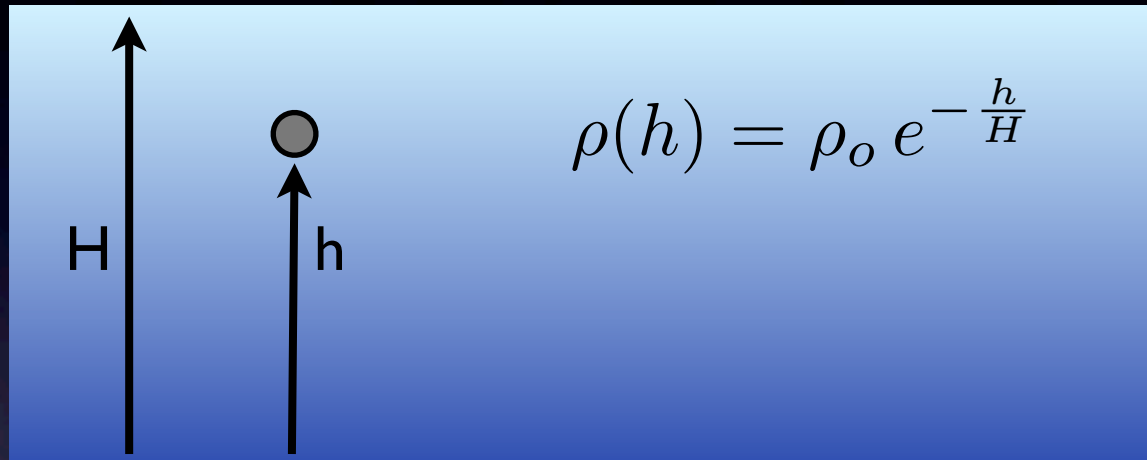


The diagram shows a vertical blue gradient background representing the atmosphere. On the left, a long vertical arrow points upwards and is labeled 'H'. To its right, a shorter vertical arrow points upwards to a small grey circle and is labeled 'h'. To the right of these arrows, the equation  $\rho(h) = \rho_o e^{-\frac{h}{H}}$  is displayed.

$$\rho(h) = \rho_o e^{-\frac{h}{H}}$$

# A que altura se fragmentam? (I)

- A densidade da atmosfera diminui com a altitude segundo:



- Quando a pressão dinâmica  $P_{ram}$  iguala a força de coesão  $S$  o corpo fragmenta-se:

$$P_{ram}(h) = \rho(h) v^2 = \rho_o e^{-\frac{h}{H}} v^2 = S$$
$$\Rightarrow h = H \ln \left( \frac{\rho_o v^2}{S} \right)$$

# A que altura se fragmentam? (II)

- Exemplos:

## Meteoro de Ferro

$$S = 10^8 \text{ N/m}^2$$

$$v = 10 \text{ km/s} = 10^4 \text{ m/s}$$

$$\rho_o = 1 \text{ kg/m}^3$$

$$\Rightarrow h = H \ln (1 \times 10^8 / 10^8) = H \ln (1) = 0$$

$\Rightarrow$  Rebentaria no mesmo instante em que chega ao solo!

## Queda de cometa

$$S = 10^4 \text{ N/m}^2$$

$$v = 10 \text{ km/s} = 10^4 \text{ m/s}$$

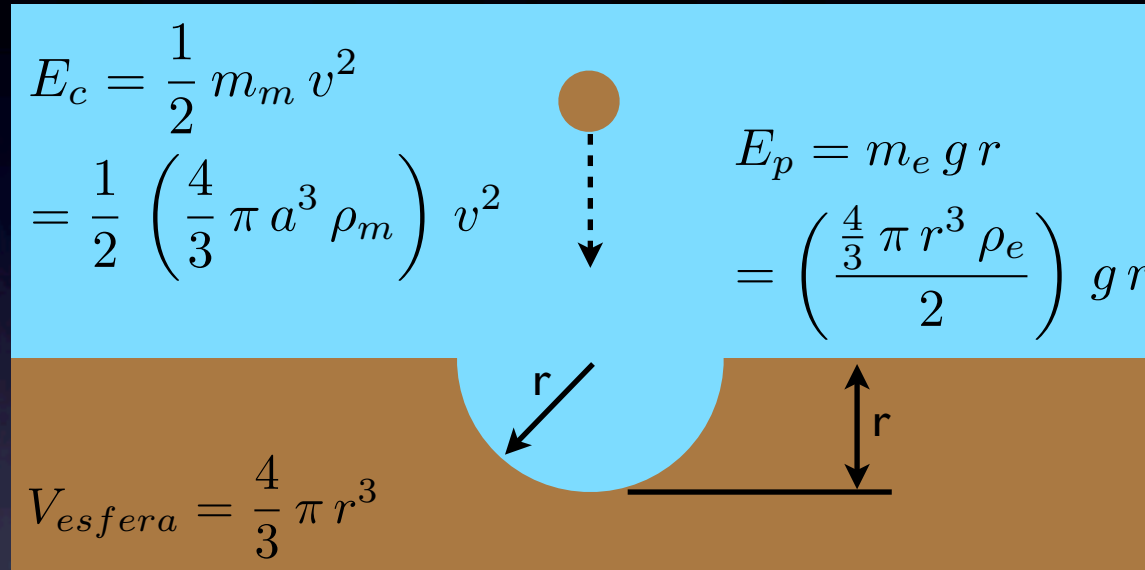
$$\rho_o = 1 \text{ kg/m}^3$$

$$\Rightarrow h = H \ln (1 \times 10^8 / 10^4) = H \ln (10^4) = 100 \text{ km}$$

$\Rightarrow$  Rebenta muito alto!

# E a cratera?

- Sabendo a energia cinética do meteoro podemos fazer uma estimativa grosseira do tamanho da cratera.


$$E_c = \frac{1}{2} m_m v^2$$
$$= \frac{1}{2} \left( \frac{4}{3} \pi a^3 \rho_m \right) v^2$$
$$E_p = m_e g r$$
$$= \left( \frac{\frac{4}{3} \pi r^3 \rho_e}{2} \right) g r$$
$$V_{esfera} = \frac{4}{3} \pi r^3$$

- Supondo que toda a energia cinética do meteoro é utilizada no transporte do ejecta vencendo a força de gravidade da Terra para subir uma altura  $r$ , temos:

$$\frac{2}{3} \pi \rho_m a^3 v^2 = \frac{2}{3} \pi \rho_e g r^4 \Rightarrow r = \sqrt[4]{\frac{\rho_m v^2 a^3}{\rho_e g}}$$



# E a cratera?

- Sabendo a energia cinética do meteoro podemos fazer uma estimativa grosseira do tamanho da cratera.

$$\frac{2}{3} \pi \rho_m a^3 v^2 = \frac{2}{3} \pi \rho_e g r^4 \Rightarrow r = \sqrt{\sqrt{\frac{\rho_m v^2 a^3}{\rho_e g}}}$$

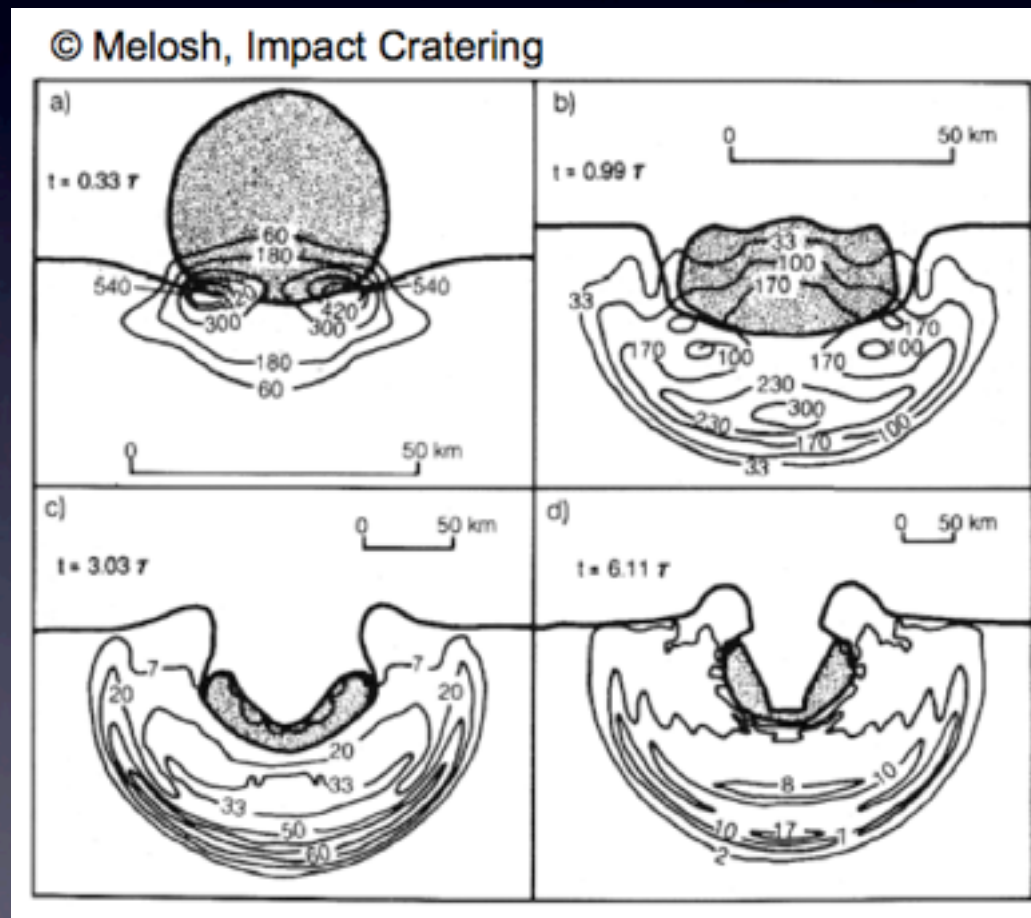
## Exemplo

$$\begin{aligned} a &= 1000 \text{ m} \\ v &= 30 \text{ km/s} = 30000 \text{ m/s} \\ \rho_m &= \rho_e = 3000 \text{ kg/m}^3 \\ g &= 9.8 \text{ m/s}^2 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow r \approx \sqrt{\sqrt{10^{17}}} \approx 17 \text{ km}$$

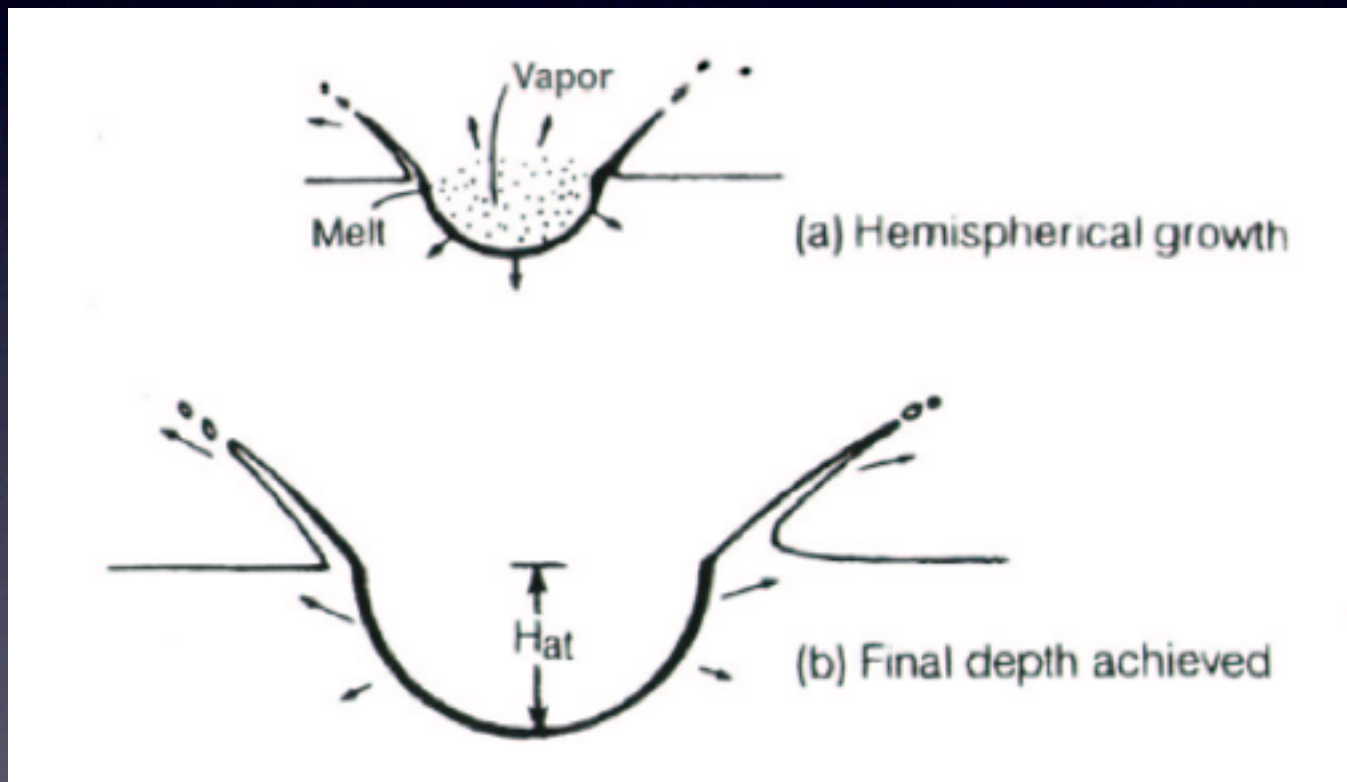
# Formação da cratera

- A formação da cratera é um processo bastante complexo e com várias fases.



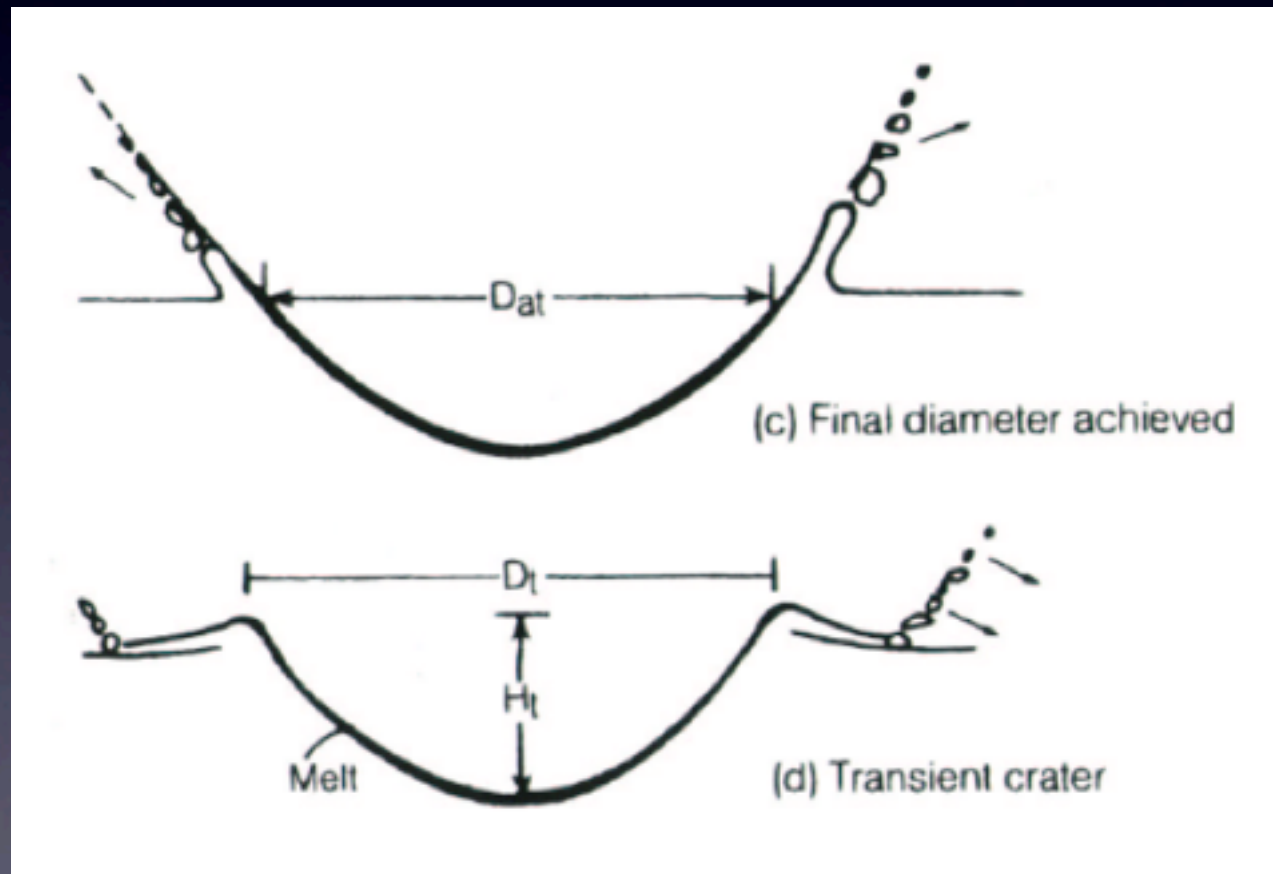
# Formação da cratera

- A formação da cratera é um processo bastante complexo e com várias fases.



# Formação da cratera

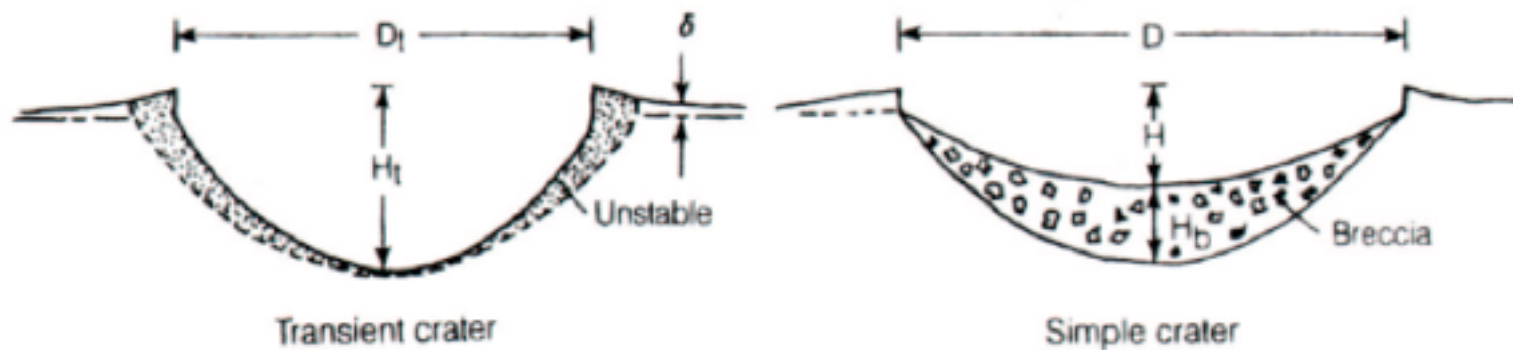
- A formação da cratera é um processo bastante complexo e com várias fases.





# Formação da cratera

- A formação da cratera é um processo bastante complexo e com várias fases.



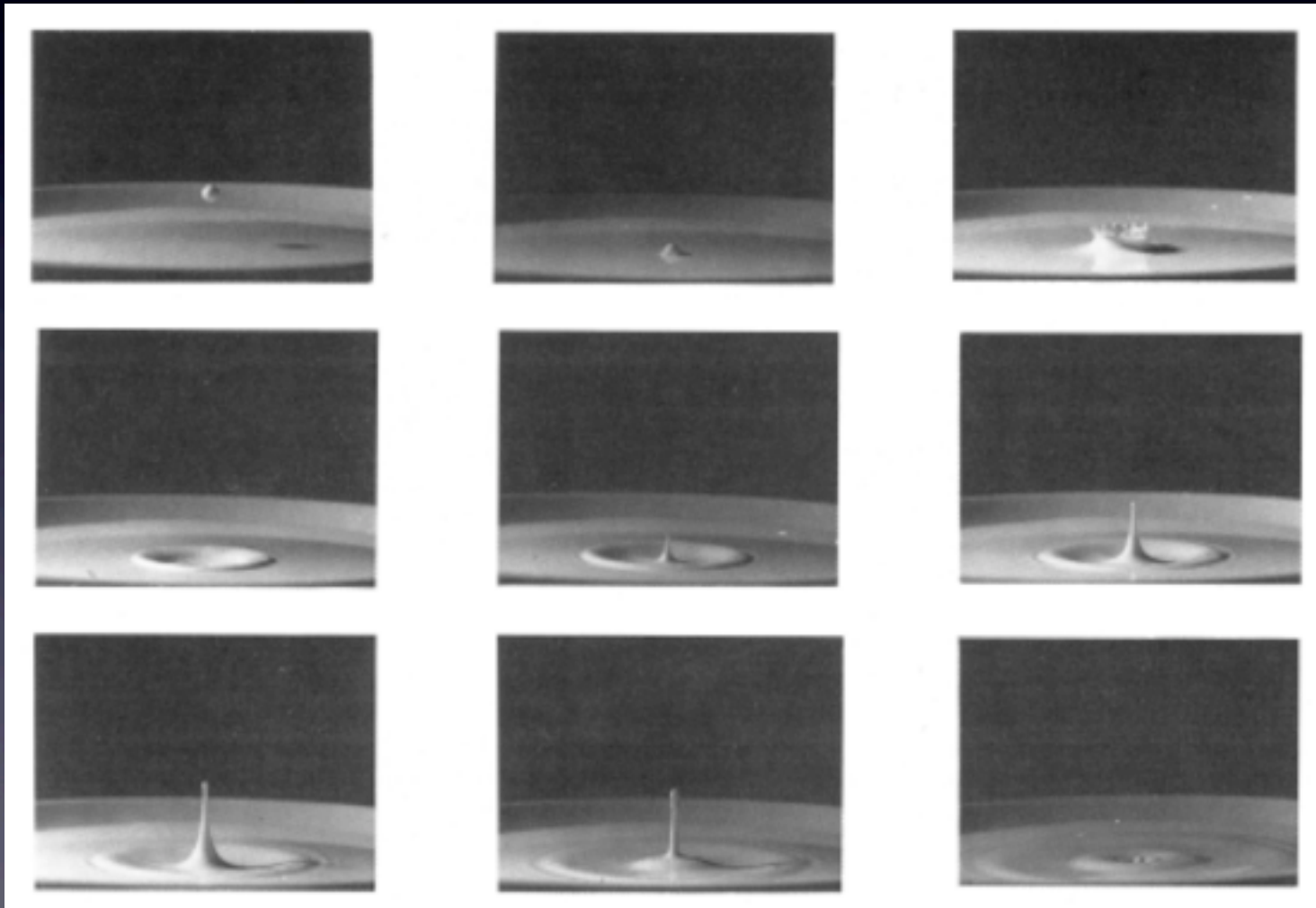
Tempo de formação cratera hemisférica:  $t_f \approx \sqrt{\frac{D}{g}}$

Exemplo:  $D=2000 \text{ m}$ ,  $g=9.8 \text{ m/s}^2 \Rightarrow t_f \approx 14 \text{ s}$

Profundidade final de uma cratera hemisférica:  $H \approx \frac{D}{5}$

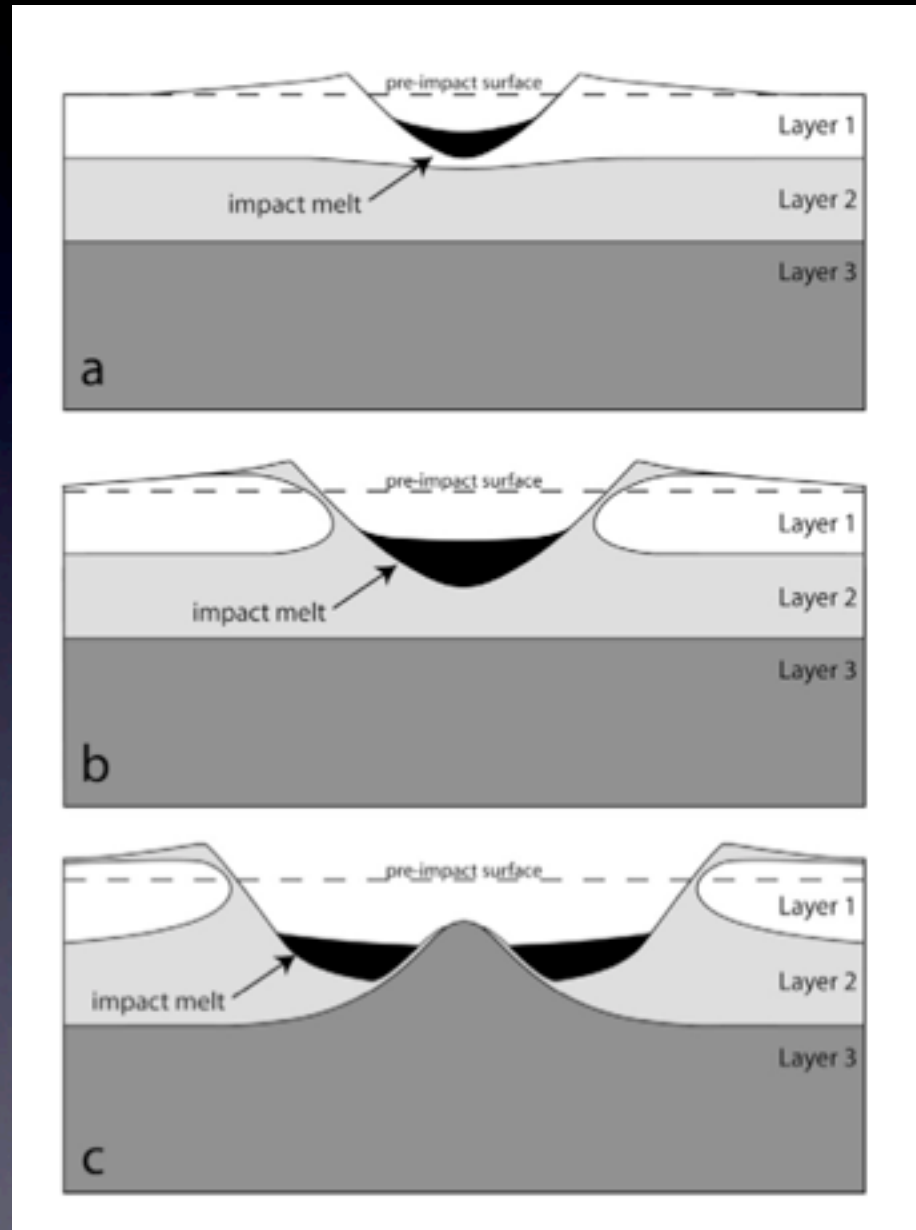
# Formação da cratera

- A formação da cratera é um processo bastante complexo e com várias fases.



# Importância do seu estudo

- Estudar crateras permite-nos estimar a idade da superfície de um objecto.
- Permite-nos também estimar a rigidez de um objecto.
- As crateras trazem para a superfície material do subsolo que de outra forma não conseguiríamos estudar.



# Afinal qual é o perigo?

- Objectos de 5-10 m de diâmetro: uma vez por ano.
- Objectos de 50 m: uma vez cada 1000 anos.
- Objectos de 1 km: uma vez cada meio milhão de anos.
- Objectos de 5 km: uma vez cada 10 milhões de anos.



# Grandes Eventos I

- Há 65 milhões de anos um objecto de cerca de 10 km caiu na Terra e levou à extinção do Cretácico. Esse objecto pode ter sido um fragmento do asteróide Baptistina. Em princípio criou a cratera Chicxulub no Yucatan, México.



“Não há dúvidas... um asteróide matou os dinossauros!”

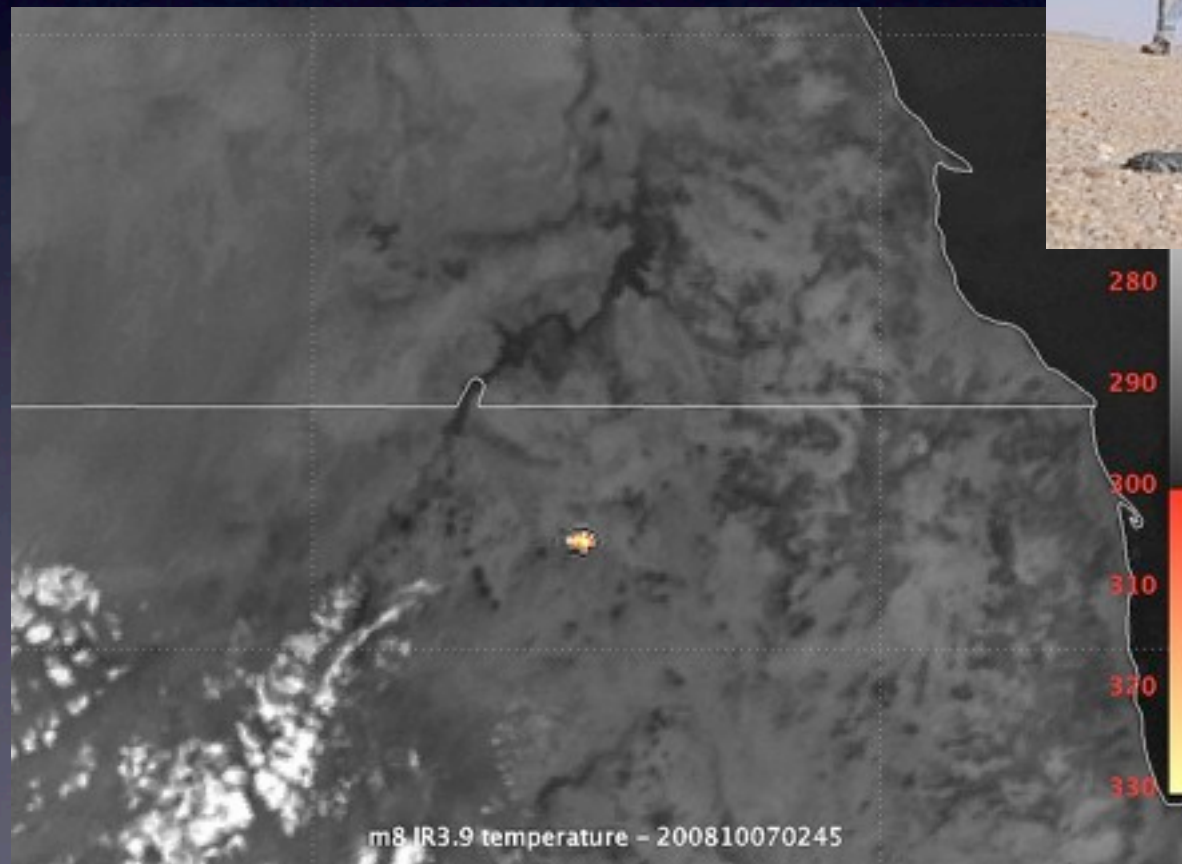
# Grandes Eventos II

- Em 1908, um objecto de tamanho desconhecido explodiu 8 km antes de bater no solo em Tunguska, Rússia, devastando uma área de mais de 2000 km<sup>2</sup>.



# Um Pequeno Evento

- A 7 de Outubro de 2008, o Near Earth Object (NEO) 2008TC3, de cerca de 5 m, caiu no Sudão, como previsto.
- O impacto na atmosfera foi detectado.
- Recuperaram-se mais de 600 fragmentos.



# De onde vêm?



# Principalmente: da Cintura de Asteróides

- Essencialmente estão entre Marte e Júpiter (2-3.5 AU).
- Distribuição não uniforme.
- Conhecem-se mais de 300000.
- $M_{\text{total}} \sim 3.5 \times 10^{21} \text{ kg}$  ( $\sim 0.0006 M_{\oplus}$ ).
- Os NEA (Near-Earth Asteroids) possuem periélios entre as 0.983 e 1.017 AU, portanto, passam muito próximo da Terra: Atens, Apolos, Amors.

## *THE MIDDLE SOLAR SYSTEM*

This animation shows the motion of the middle part of the solar system over a two-year time period. The sun is at the center and the orbits of the planets Mercury, Venus, Earth Mars and Jupiter are shown in light blue (the locations of each planet are shown as large crossed circles). Comets are shown as blue squares (numbered periodic comets are filled squares, other comets are outline squares). Main-belt minor planets are displayed as green circles, near-Earth minor planets are shown as red circles.

The individual frames were generated on an OpenVMS system, using the PGPLOT graphics library. The animation was put together on a RISC OS 4.03 system using !InterGif.



# Principalmente: da Cintura de Asteróides

- Essencialmente estão entre Marte e Júpiter (2-3.5 AU).
- Distribuição não uniforme.
- Conhecem-se mais de 300000.
- $M_{\text{total}} \sim 3.5 \times 10^{21} \text{ kg}$  ( $\sim 0.0006 M_{\oplus}$ ).
- Os NEA (Near-Earth Asteroids) possuem periélios entre as 0.983 e 1.017 AU, portanto, passam muito próximo da Terra: Atens, Apollos, Amors.

## *A Ride With The Earth*

An animation centered on Earth showing the known objects that have approached to within 20 million km between July 2007 and June 2008.

See the Animations Page on the MPC website for a description of the symbols used in this animation.

# Mas também: cometas, vindos de mais longe

- Bolas/blocos de gelos e poeiras.
- Originários da Cintura de Kuiper, i.e., de uma cintura de objectos para além de Neptuno (onde pertence Plutão), descoberta apenas em 1992.
- E da Nuvem de Oort , i.e., uma “casca esférica” em torno do Sistema Solar entre as 50000-200000 AU, teorizada em 1950 mas inobservável.



# Mas também: cometas, vindos de mais longe

- Bolas/blocos de gelos e poeiras.
- Originários da Cintura de Kuiper, i.e., de uma cintura de objectos para além de Neptuno (onde pertence Plutão), descoberta apenas em 1992.
- E da Nuvem de Oort , i.e., uma “casca esférica” em torno do Sistema Solar entre as 50000-200000 AU, teorizada em 1950 mas inobservável.

## *THE OUTER SOLAR SYSTEM*

This animation shows the motion of the outer part of the solar system over a 100-year time period. The sun is at the center and the orbits of the planets Jupiter, Saturn Uranus and Neptune are shown in light blue (the locations of each planet are shown as large crossed circles).

Comets: blue squares (filled for numbered periodic comets, outline for other comets)

High-e objects: cyan triangles

Centaurs: orange triangles

Plutinos: white circles (Pluto itself is the large white crossed circle)

“Classical” TNOs: red circles

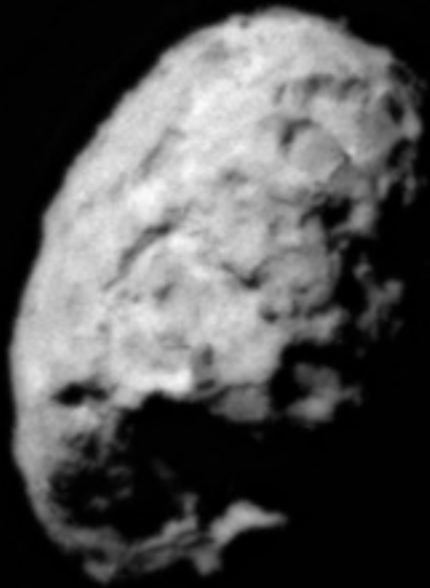
Scattered Disk Objects: magenta circles

The individual frames were generated on an OpenVMS system, using the PGPLOT graphics library. The animation was put together on a RISC OS 4.03 system using !InterGif.

# Quando inactivos, os cometas parecem asteróides.

- Os núcleos têm dimensões de 1 a 50 km.

Wild 2: Stardust, Nasa



Inactivo

Hartley 2: Epoxi, Nasa



Activo

# “Rebentando com um cometa”

- Em 2005 a sonda Deep Impact lançou um projectil contra o cometa Tempel 1.
- O ejecta criado pelo impacto levou à conclusão que provavelmente os cometas são mais “bolas de poeira cheias de gelos” do que “bolas de gelos com poeiras”.





# Fragmentação de cometas e colisões

- Em 1994 o Shoemaker-Levy 9 foi observado a fragmentar-se e cair sobre Júpiter.

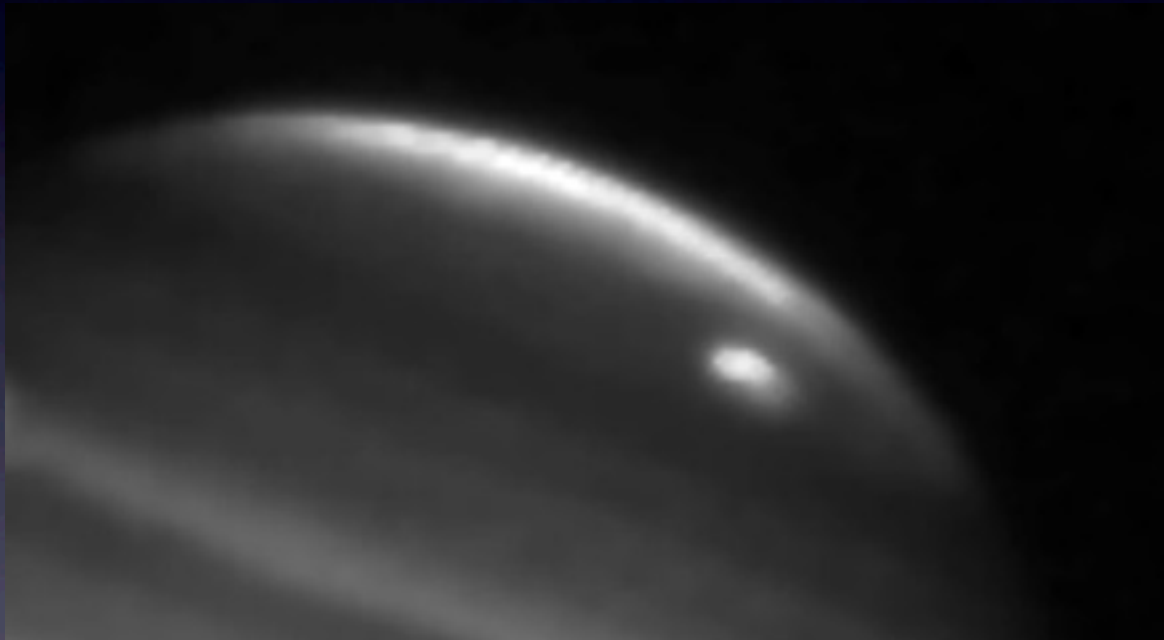


- E no dia 19 de Julho de 2009 caiu mais qualquer coisa em Júpiter!



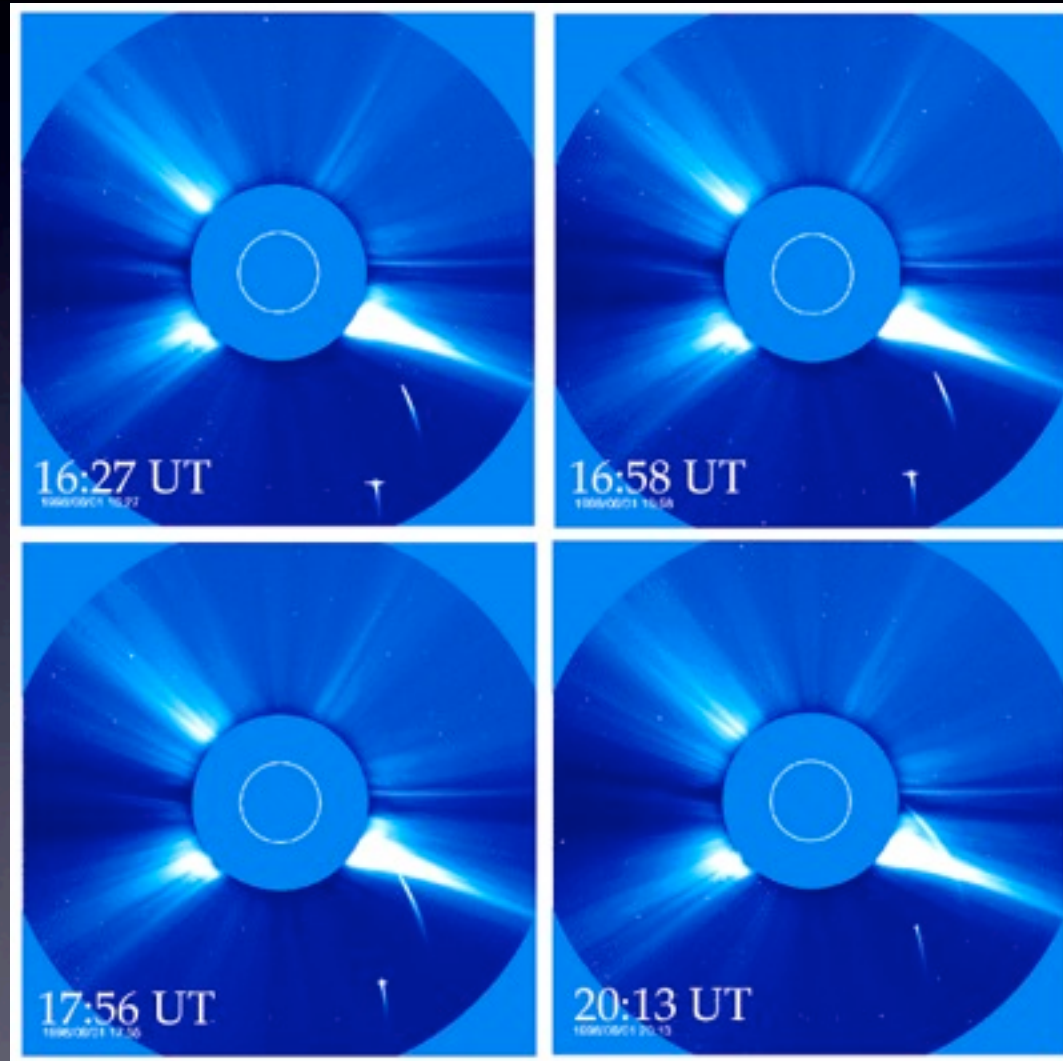
Anthony Wesley, Murrumbateman Australia  
19 Jul 2009 15:06.5 Z CMI 171 CMII 180 CMIII 272

- E no dia 19 de Julho de 2009 caiu mais qualquer coisa em Júpiter!



# Cometas caindo no Sol

- Em 1998, ao estudar o Sol, a sonda Soho detecta dois cometas, tendo detectado cerca de 2000 até hoje.



# Que fazer?



# Problemas

- Um objecto com 50 m de diâmetro é difícil de observar excepto quando já está muito perto.
- Para podermos fazer alguma coisa o pré-aviso tem de ser grande.



Nilus: Origone / Bertrand Editores

O que está a ser feito?

# Primeiro: detectar

## Pan-STARRS

O grande projecto de 4 telescópios de 1.8 m, a instalar no Hawaii, cujo principal objectivo é detectar Near Earth Objects que possam causar impactos na Terra. Um está já em funcionamento. O sistema ficará completo em 2012.

Já existem, no entanto, vários projectos com telescópios automatizados mais pequenos (Spacewatch, LINEAR, LONEOS...) a rastrear constantemente o céu, mas não conseguem detectar objectos de centenas de metros com a necessária antecedência.

# Depois: destruir?

- Destruir um potencial impactor é muito delicado.
- Não é fácil acertar numa coisa que anda a mais de 10 km/s.
- Não é fácil “vaporizar” um corpo de um ou mais quilómetros de tamanho.
- Fragmentá-lo pode solucionar o problema, mas também pode piorar.

# ...ou desviar?

- Alterar a órbita com uma série de explosões nucleares.
- Impactor Cinético: alterar a órbita com um impacto de uma sonda de grande massa.
- Tractor Gravitacional: colocar um satélite em órbita do asteróide com um pequeno propulsor, ao longo dos anos alterará a órbita do asteróide.
- Focar luz solar no asteroide (com uma lente gigante) levaria a uma leve vaporização e a outros efeitos físicos que alterariam a sua órbita.
- Ou até pintá-lo de branco para alterar a sua órbita devido ao diferente efeito da radiação solar.
- ...



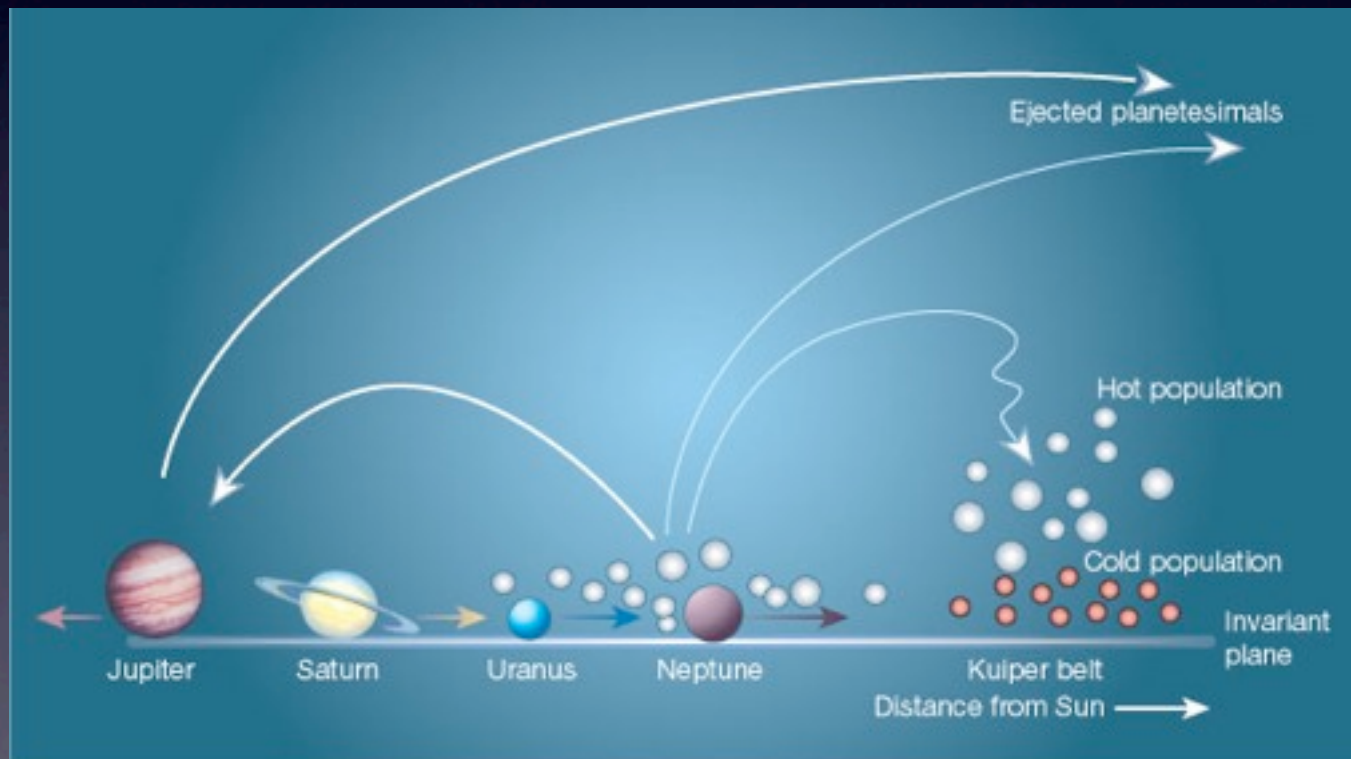
Os impactos são  
sempre maus?

Os impactos são  
sempre maus?

Não!

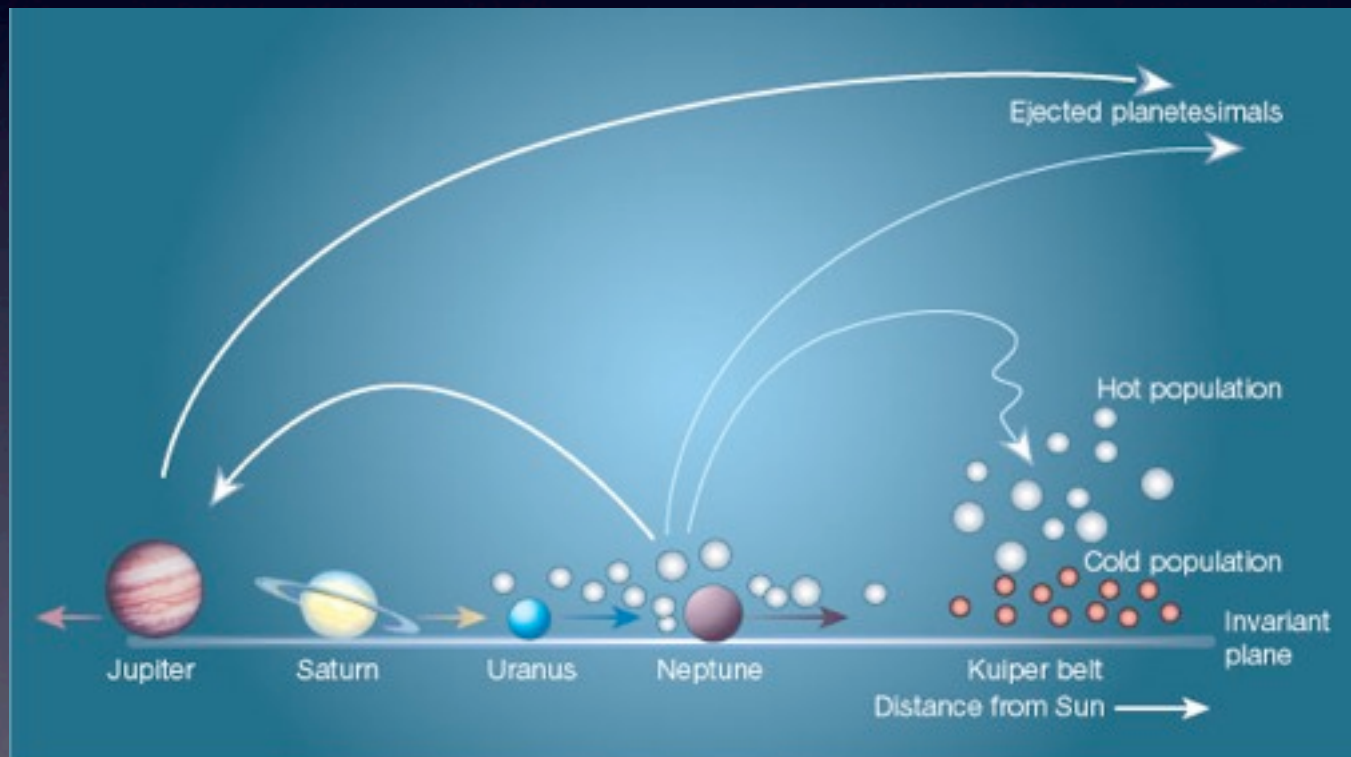
# Exemplos

- A estrutura da Cintura de Kuiper implica que os planetas gigantes migraram.
- Essa migração criou um caos de colisões há cerca de 3.8 mil milhões de anos.
- Nesse período caíram imensos cometas na Terra podendo ter trazido até 50% da água da Terra (mas mais provavelmente de 5 a 25%).



# Exemplos

- A estrutura da Cintura de Kuiper implica que os planetas gigantes migraram.
- Essa migração criou um caos de colisões há cerca de 3.8 mil milhões de anos.
- Nesse período caíram imensos cometas na Terra podendo ter trazido até 50% da água da Terra (mas mais provavelmente de 5 a 25%).



- Os dinossauros eram ruins como as cobras e se ainda andassem por aí era um problema.

Mas... a questão é muito séria e se temos tecnologia para isso então temos absolutamente de nos proteger.



Mas... a questão é muito séria e se temos tecnologia para isso então temos absolutamente de nos proteger.

Pode não cair hoje,  
nem amanhã,  
nem daqui a 100 anos...  
mas um dia cai.

# Fim