

PLANETAS E SISTEMAS

PLANETÁRIOS

(AGA0502)

COMETAS

Enos Picazzio

IAGUSP

NOTAS DE AULA. NÃO HÁ PERMISSÃO DE USO PARCIAL OU TOTAL
DESTE MATERIAL PARA OUTRAS FINALIDADES.



Cometa C/1975 V1 (West)

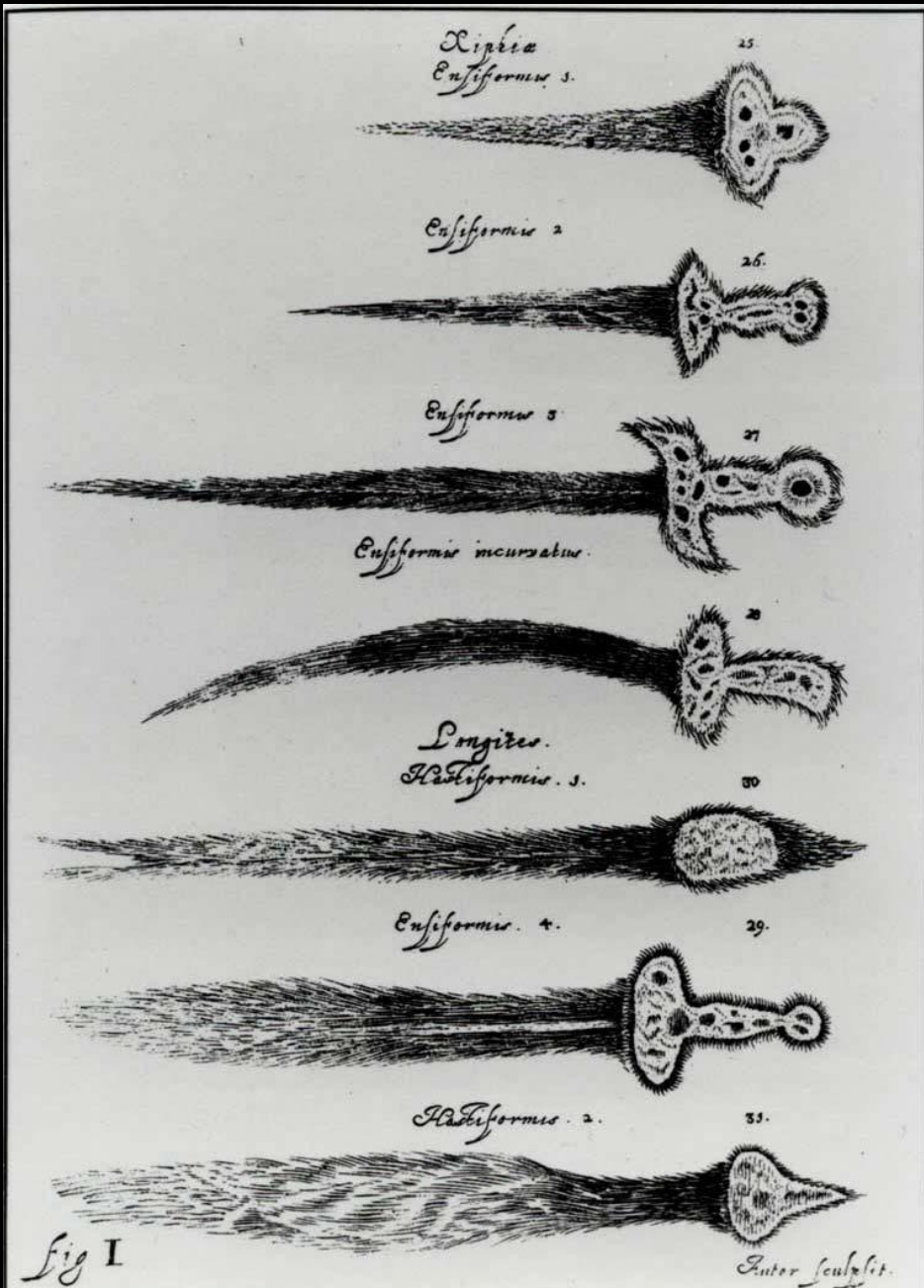
Os cometas no cenário histórico



"[O elmo de Aquiles brilhou]
como a estrela vermelha, que
a partir de seu cabelo
flamejante despejou doença,
peste e guerra"
(Ilíada, Bk. XIX, 11, 380-3).

Sugestão de leitura: *Cometas. Do Mito à Ciência*, Oscar T. Matsuura, Ed. Icone (1985)

Os cometas no cenário histórico



Tipos de formas de
cometas

Ilustrações de
Cometographia
Johannes Hevelius

(Danzig, 1668)

NASA / JPL

Os cometas no cenário histórico

Tapeçaria de Bayeux

Imenso tapete, datado do século XI, que descreve os eventos-chave da conquista normanda da Inglaterra por Guilherme II da Normandia (batalha de Hastings, 14/10/1066). Quase a metade das cenas, no entanto, descrevem fatos anteriores à própria batalha. A tapeçaria tem inestimável valor documental acerca do século XI na Inglaterra e na Normandia, incluindo vestuário, castelos, navios e condições de vida da época. Ref. [Site oficial da Tapeçaria de Bayeux](#).



Cometa
1P/Halley



Corpos pequenos,
compostos de rocha
e gases congelados,
que orbitam o Sol.

Percorrem grandes
distâncias.

São os corpos
primitivos que mais
se afastam e se
aproximam do Sol.



Cometa Hale-Bopp (C/1995 O1)

Os cometas no cenário cósmico



C/ 1995 O1 (Hale-Bopp)



Os cometas são remanescentes do material formado nas regiões mais frias do SS.

Quedas na Terra foram fundamentais para enriquecimento com materiais voláteis, sobretudo água e compostos orgânicos.

E eles se aproximam da Terra!



C/2001 A2 (Linear)

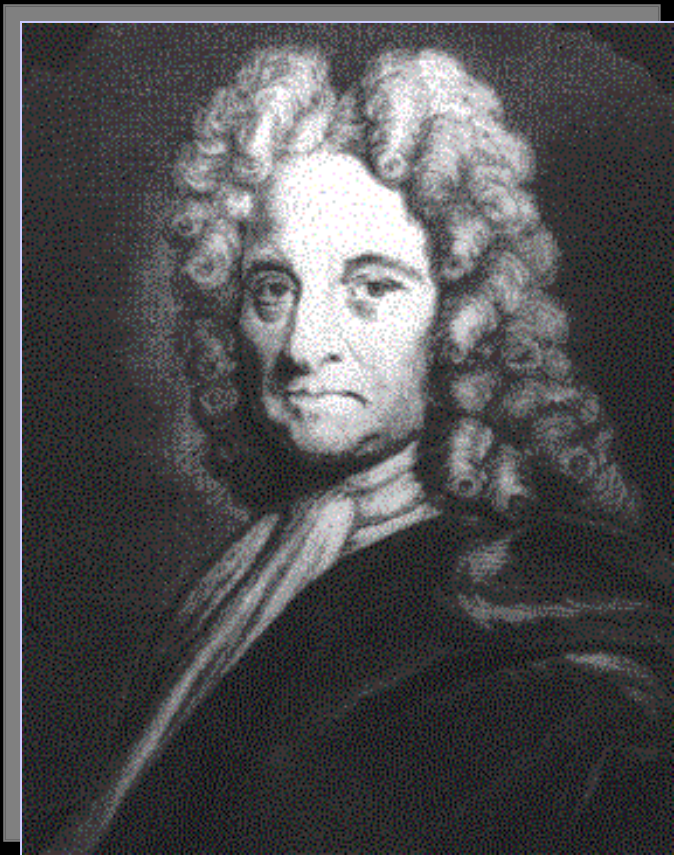


Data	História: Conclusões e Questionamentos [http://www.creationscience.com/onlinebook/Comets8.html]	Cientista	Referência
340 a.C.	Cometas não são planetas, cometas mudam a aparência rapidamente e não viajam no estreito caminho planetário através do céu.	Aristóteles	Lee
63	Muitas características cometárias mostram que eles são estrelas, planetas, fogos ou fenômenos atmosféricos.	Sêneca	Corcoran
635	As caudas dos cometas geralmente apontam em direção oposta a do Sol [Isto implica em uma relação entre cometas e Sol]	Li Chung-feng	Y, 46–47
1577	Cometas não viajam através da atmosfera terrestre, mas além da Lua e em direção "ao reino dos planetas". ⁵²	Brahe	B, 61; PLB, 17
1665	Cometas específicos reaparecem. [Embora seja comum atribuir-se esta afirmação à Edmond Halley em 1705, há registros de que Robert Hooke afirmou isso bem antes, quando Halley tinha apenas 9 anos.] Jean-Dominique Cassini fez afirmação semelhante em 1681.	Hooke	Pepys; SD, 48
1680	Cometas não viajam em trajetórias retas. Elas são [praticamente] parábolas.	Dörffel	Y, 99; PLB, 70
1687	Usualmente os cometas são vistos perto do Sol, logo eles orbitam o Sol. Vapor circundando o núcleo brilha quando este se aproxima do Sol. Os cometas obedecem à lei de gravitação de Newton. [Como eles obedecem leis naturais, fixas, eles não anunciam catástrofes aos humanos.]	Newton	Newton
1698	Seis números, chamados elementos orbitais, descevem o movimentos dos cometas se as perturbações planetárias forem desprezadas. Os elementos orbitais ajudam a identificar cometas já vistos anteriormente e que estão retornando.	Halley	W, 37–40
1705	Nunhum cometa aproxima-se em órbita hiperbólica. [Nenhum cometa vem de fora do Sistema Solar.]	Halley	PLB, 124
1759	Com grande esforço computacional para ajustar as perturbações planetárias as posições dos cometas podem ser conhecidas no futuro ou no passado, com boa precisão.	Clairaut	W, 43
1805	Cometas têm densidades extremamente baixas e são feitos de gelo de água.	Laplace	Whipple ⁵⁵

Data	História: Conclusões e Questionamentos [http://www.creationscience.com/onlinebook/Comets8.html]	Cientista	Referência
1812	Órbitas alongadas e largamente espalhadas em inclinações são melhor explicadas por uma explosão no Sistema Solar.	Lagrange	Y, 304–305
1819	Cometas brilham por luz refletida, não por sua própria.	Arago	PLB, 167
1864	Análise espectral da luz de um cometa revela parte da sua composição química.	Donati	Y, 214; W, 106
1866	Fluxos de meteoros estão associados aos cometas.	Schiaparelli	W, 97
1868	Cometas contém moléculas orgânicas. Por que? Qual é a fonte do carbono?	Huggins	SD, 146–155
1884	Como cometas tão frágeis e de vidas curtas poderiam ser forçados a constituir a família de Júpiter?	Proctor	Proctor ⁵⁶
1925	Como os cometas poderiam sobreviver por bilhões de anos?	Russell	B, 67
1948	Por que há tantos cometas de períodos curtos e prógrados, e tantos outros de períodos longos e retrógrados?	van Woerkom	van Woerkom
1950	Cometas quase parabólicos caem em direção ao Sol com energias enormes e similaridades extraordinárias.	Oort	Oort
1973	Cometas não podem ser formados longe do Sol.	Öpik	Öpik
1986	A cada 3 segundos, um pequeno cometa choca-se com a alta atmosfera da Terra e vaporiza.	Frank	Frank
1986	Por que pequenos cometas não formam mais crateras lunares e não depositam mais água na Terra, Vênus e Marte?	Donahue	Donahue ⁵⁸
1998	Raramente os cometas são ricos em hidrogênio pesado. Onde os cometas surgiram?	Meier	Meier

Referências abreviadas: B=Bailey et al., PLB=Peter Lancaster Brown, SD=Sagan and Druyan, W=Whipple (Mysteries), Y=Yeomans.

Edmund Halley descobre a periodicidade dos cometas



- Utilizando a teoria de gravitação de Isaac Newton, Halley mostrou em 1705 que os cometas de 1531, 1607, e 1682 tinham propriedades orbitais semelhantes:
 - Período: 76 anos;
 - $a = 18$ UA (Urano: 19 UA)
 - órbita altamente excêntrica e inclinada em relação à eclíptica
- Halley os identificou como um mesmo cometa e previu seu retorno para 1758. O cometa retornou na data certa, após a morte de Halley.

Há registros chineses do cometa Halley datando do 5º. Séc. a.C.

Designação dos cometas

- P/ para um cometa periódico (período orbital menor que 200 anos)
- C/ para um cometa não periódico
- X/ para um cometa com órbita ainda não computada
- D/ para um cometa extinto ou desaparecido
- 1995 A1 - o primeiro cometa descoberto na primeira metade de Janeiro/1995
 - 1, 2, 3... respectivamente 1^o, 2^o, 3^o... cometas descobertos
 - A, B, C ... respectivamente, 1^a metade de Janeiro, 2^a metade de Janeiro, 1^a metade de Fevereiro...
 - 1995 - ano da descoberta

Exemplos de novas designações:

C/1995 Q2 (Hartley-Drinkwater)

P/1994 P1-A (Machholz 2) Fragmento A de um cometa partido

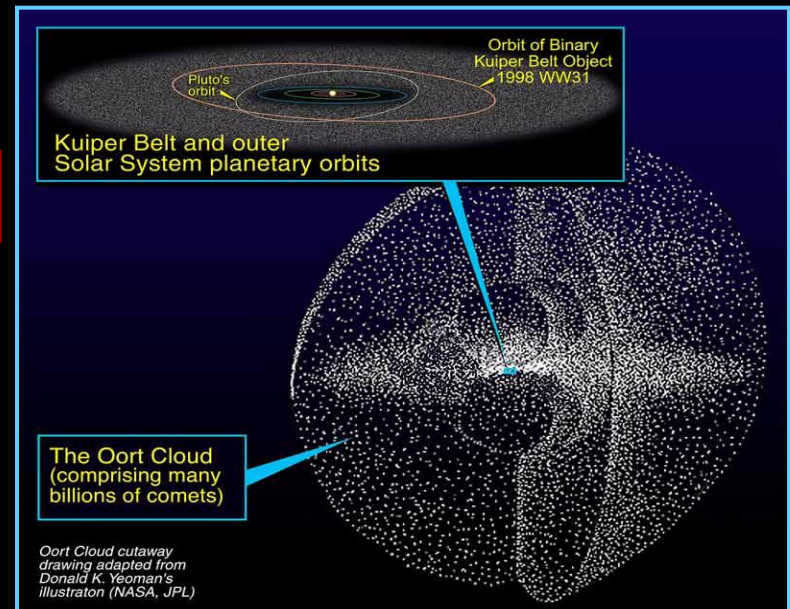
P/1996 A1 (Jedicke) Cometa periódico novo

125P Observação rotineira de um cometa periódico

Periodicidade dos cometas

Cometas de longo período

- Afélio entre 1.000 e 30.000 UA, alguns dentro da Nuvem de Oort
- Órbitas altamente excêntricas
- Inclinação aleatória, em relação ao plano da eclíptica (distribuição espacial esférica)



Cometas de curto período (ou simplesmente Periódicos*)

Afélios até o Cinturão de Edgeworth-Kuiper (30-50 UA)

- Órbitas próximas ao plano da eclíptica; inclinação menor que 30° (distribuição espacial em forma de disco)
- Parte deles tiveram a órbita alterada pela interação gravitacional com os planetas gigantes.

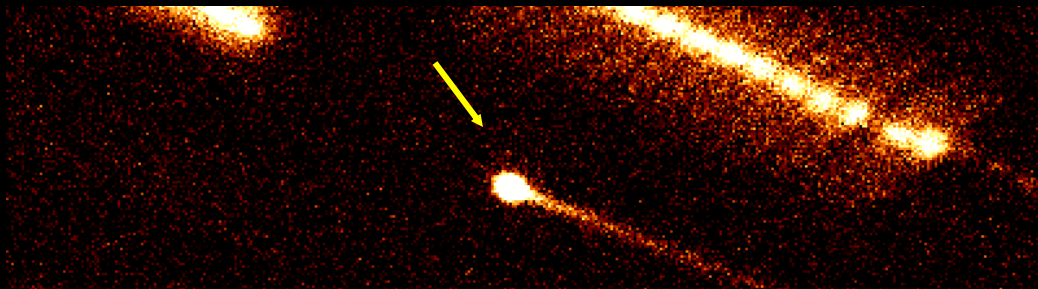
* Tecnicamente, o termo periódico aplica-se às órbitas fechadas, qualquer que seja o período. Entretanto, cometas de períodos muito longos são observados pouquíssimas vezes, não raro uma única vez. Por isso adotou-se a prática de atribuir o termo periódico (P/) àqueles de curto ou curtíssimo período, que estão quase sempre disponíveis à observação

Cometas ou asteróides?

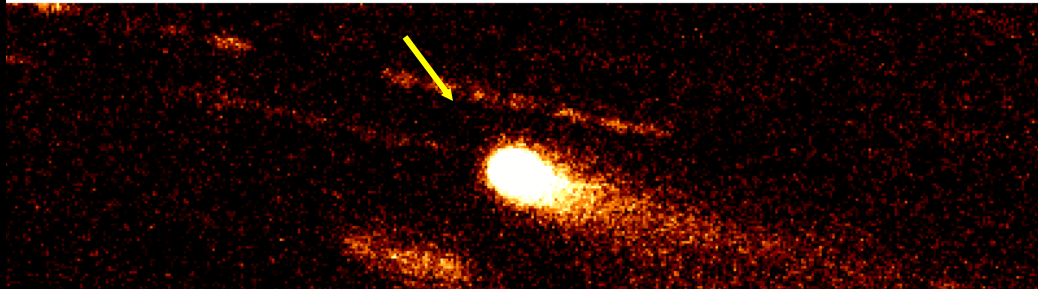
Cometas no Cinturão dos Asteróides?

Estão no Cinturão Asteroidal e têm composição química e isotópica diferentes dos demais cometas.

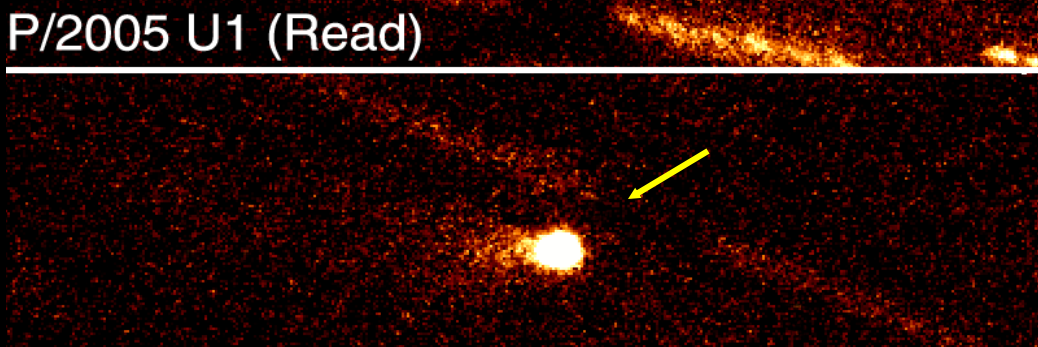
- 133P/ (7968) Elst-Pizarro: descoberto como asteróide (inativo) em 1979 e como cometa (ativo) em 1997, inativo em 2001, ativo em 2002, inativo desde então.
- P/2005 U1 (Read): descoberto como ativo em 2005
- 118401 (1999 RE₇₀): descoberto como asteróide em 1999, e como cometa (ativo) em 2005.
- Simulações dinâmicas indicam que sempre foram dessa região, ao contrário das famílias de Júpiter e de Halley



133P/Elst-Pizarro



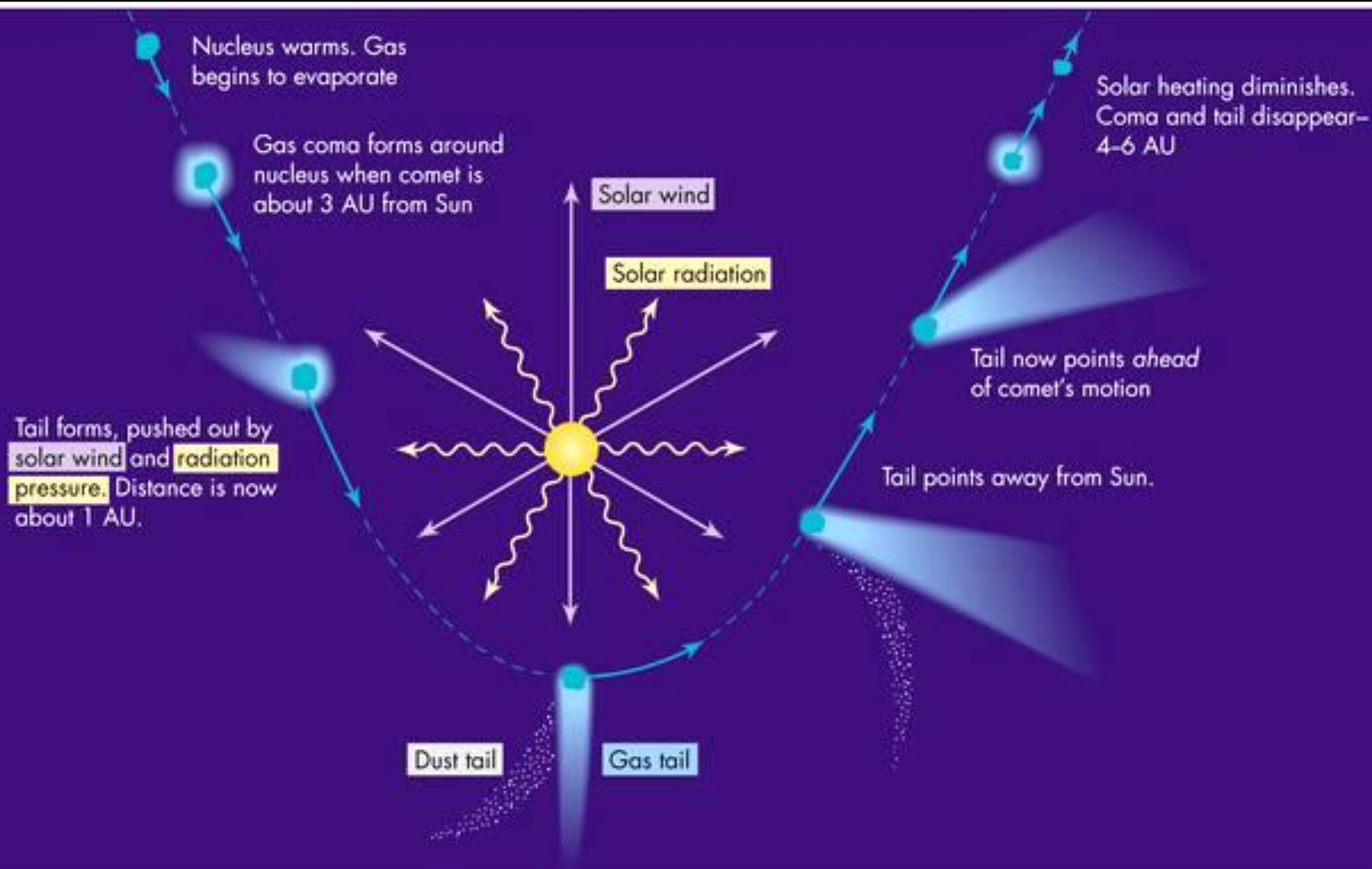
P/2005 U1 (Read)



118401 (1999 RE₇₀)

Explicação mais provável: são asteróides ricos em água congelada abaixo da superfície sofrendo colisões. O gelo fica exposto à radiação solar e vaporiza, criando coma e cauda.

Comportamento em órbita



Brilho dos cometas

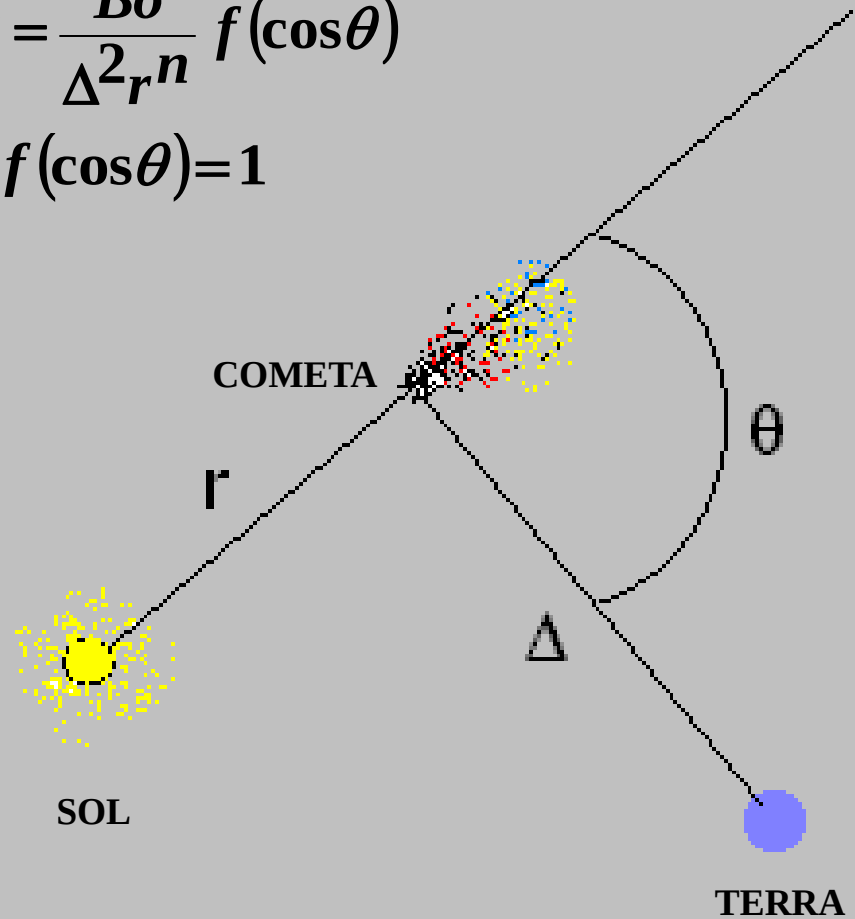
B_0 : brilho intrínseco;

Δ e **r** : distâncias geocêntrica e heliocêntrica, respectivamente;

n : índice fotométrico. Pode variar de 1 a 6 (caso raro); não é constante, nem mesmo durante a passagem do cometa.

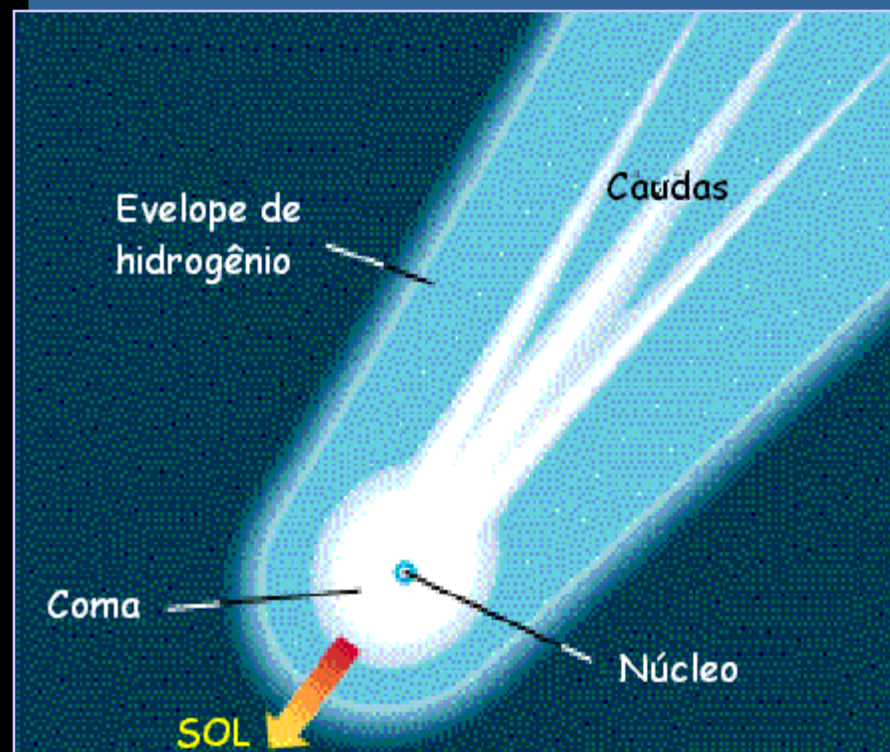
$f(\cos\theta)$: função de fase, geralmente é considerada unitária.

$$B = \frac{B_0}{\Delta^2 r^n} f(\cos\theta)$$
$$f(\cos\theta) = 1$$



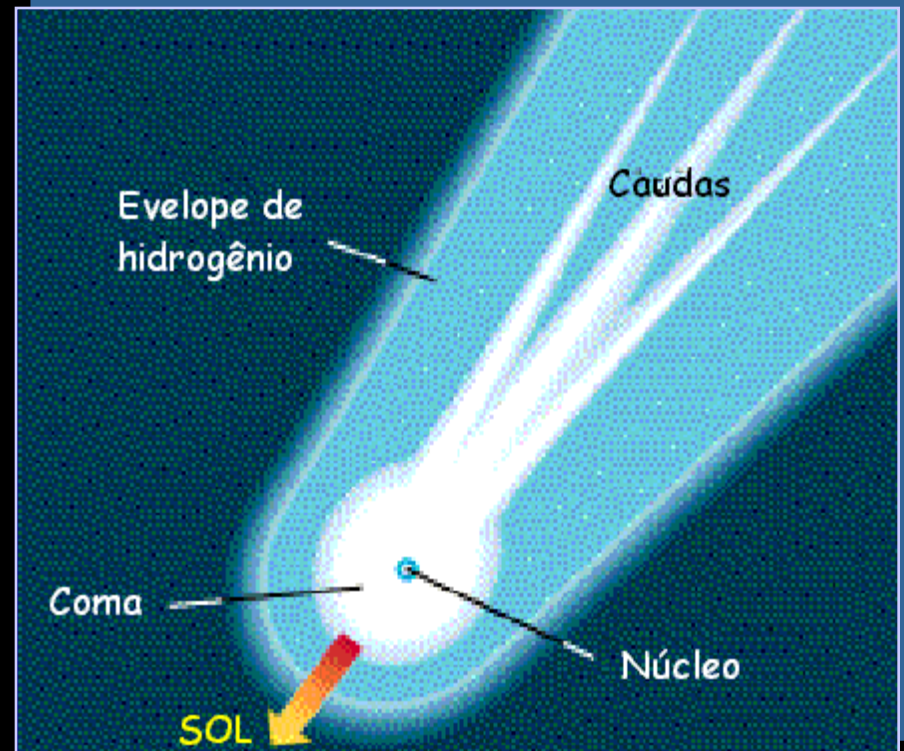
Núcleo

- ↙ Aglomerado compacto de material rochoso (meteorítico) e gelos diversos.
- ↙ Tamanho típico: 5 - 10 km
- ↙ Superfície escura (baixo albedo)
- ↙ O aquecimento provocado pela aproximação ao Sol sublima os gases (o gelo transforma-se diretamente em gás) do núcleo.
- ↙ A rotação do núcleo parece regra, evidenciada pela variação do brilho e morfologia.



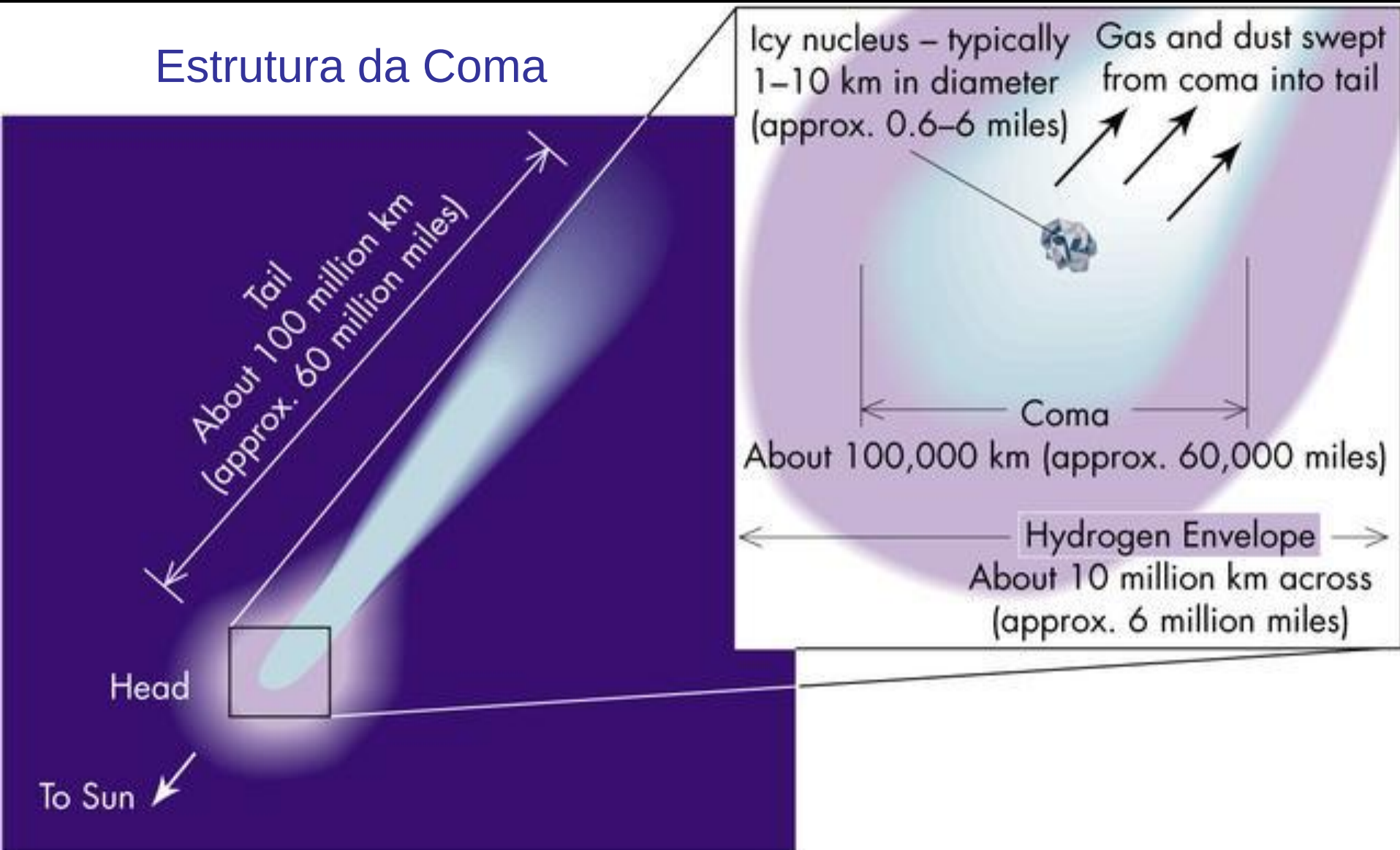
Coma

- Atmosfera de gás e poeira liberada do núcleo, em consequência do aquecimento provocado pela aproximação do cometa ao Sol.
- Diâmetro médio: 100.000 Km (9x Terra)
- Brilha por fluorescência: as moléculas de gás absorvem energia, e a reemitem em forma de luz visível
- Espécie ionizadas mais frequentes: CO^+ , N_2^+ , CO_2^+ , CH^+



Estrutura dos cometas

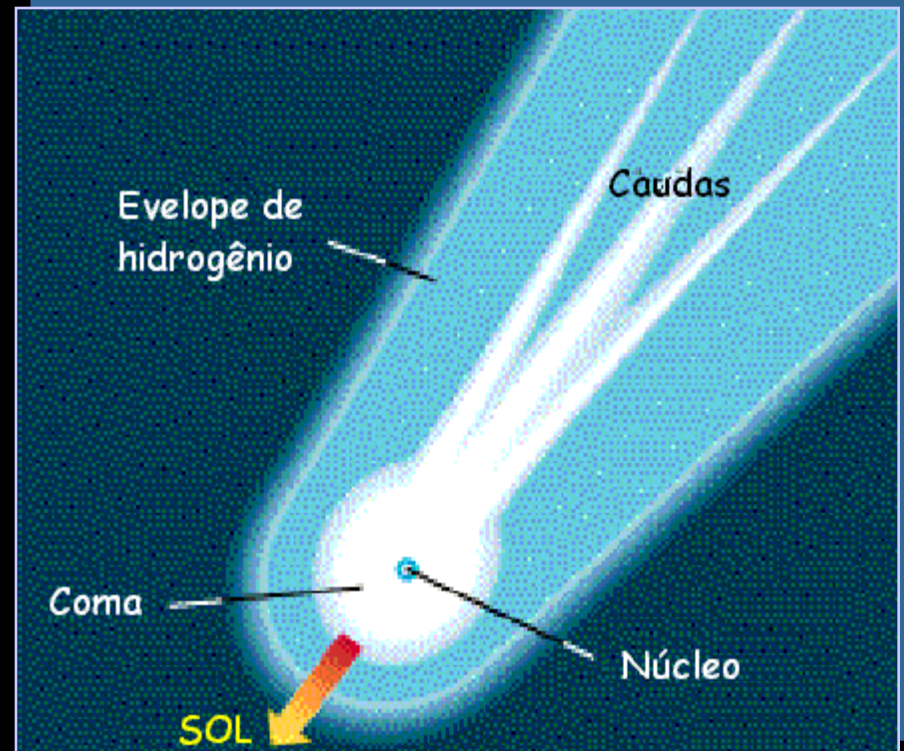
Estrutura da Coma



Envelope de Hidrogênio

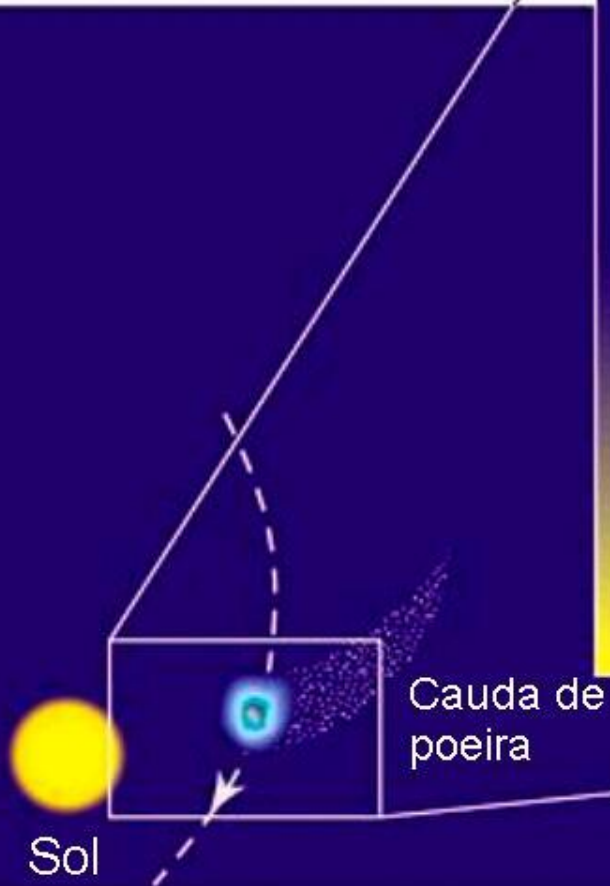
Átomos de hidrogênio, originados pela dissociação das moléculas de gás, formam um envelope que pode ultrapassar 1 milhão de quilômetros de extensão.

Esse gás de hidrogênio emite em ultravioleta.



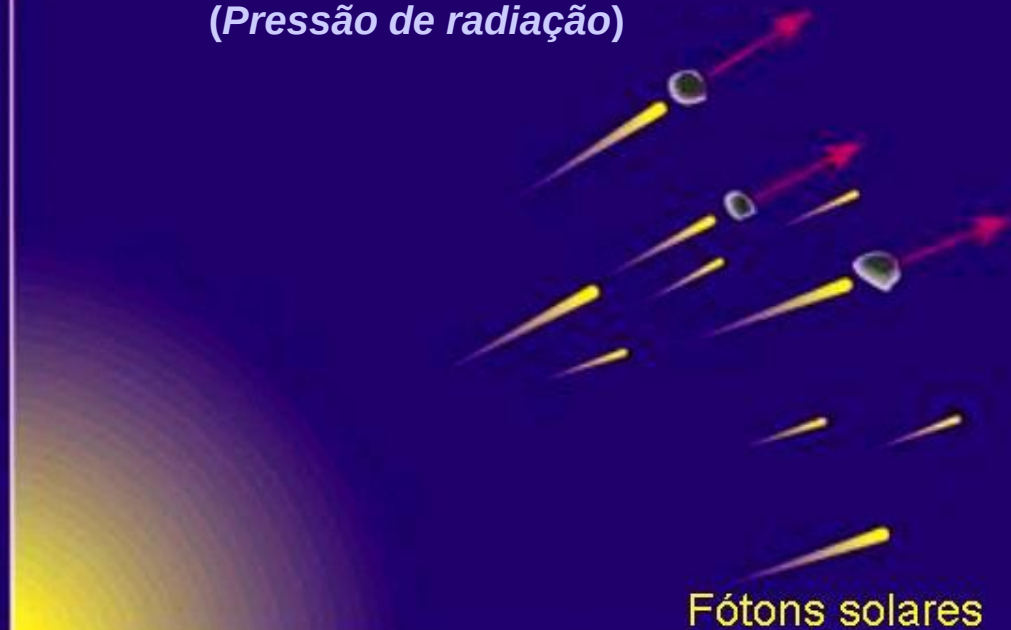
Estrutura dos cometas

Formação da cauda



Atingidas pelos fótons, as partículas de poeira são arrastadas

(*Pressão de radiação*)



Estrutura dos cometas: poeira

O fóton carrega momentum: $p = E/c$

Momentum e força se relacionam: $F = dp/dt$

Fótons são liberados pelo Sol em camada esférica.
Então a pressão (força/área) nessa esfera será:

$$P = \frac{dp/dt}{4\pi r^2} = \frac{dE/dt}{4\pi r^2 c} = \frac{L_{\odot}}{4\pi r^2 c}$$

Luminosidade do Sol

A força exercida pelos fótons em um grão de raio R é
“pressão $\times$ seção geométrica”

$$F_{rad} = \left(\frac{L_{\odot}}{4\pi r^2 c} \right) (\pi R^2) = \frac{L_{\odot} R^2}{4r^2 c}$$

Estrutura dos cometas: poeira

A força gravitacional atrativa do Sol sobre o grão é:

$$F_{grav} = \frac{GM_{\odot} M_g}{r^2} = \left(\frac{GM_{\odot}}{r^2} \right) \left(\frac{4}{3} \pi R^3 \rho_g \right) = \frac{4\pi R^3 GM_{\odot} \rho_g}{3r^2}$$

As forças de pressão de radiação e gravitacional competem.
O valor crítico de raio de grão se obtém igualando as forças:

$$F_{rad} = F_{grav}$$
$$\frac{L_{\odot} R^2}{4r^2 c} = \frac{4\pi R^3 GM_{\odot} \rho_g}{3r^2} \Rightarrow R = \frac{3L_{\odot}}{16\pi GM_{\odot} \rho_g c} \simeq 0,006 \text{ cm}$$

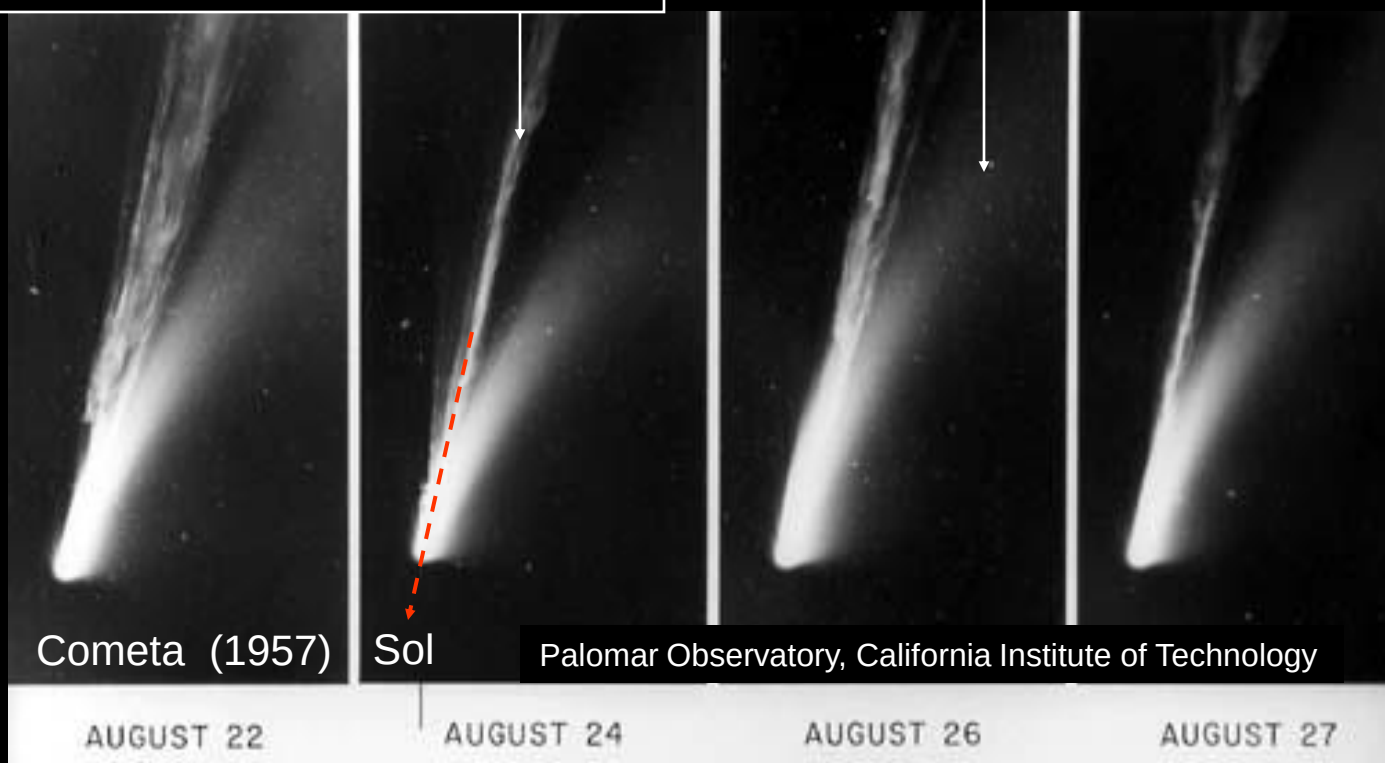
Grãos menores que 0,006 cm serão arrastados pela luz na direção oposta a do Sol. Grãos maiores ficam pelo caminho (trajetória do cometa) formando a cauda de poeira.

Estrutura dos cometas

As caudas

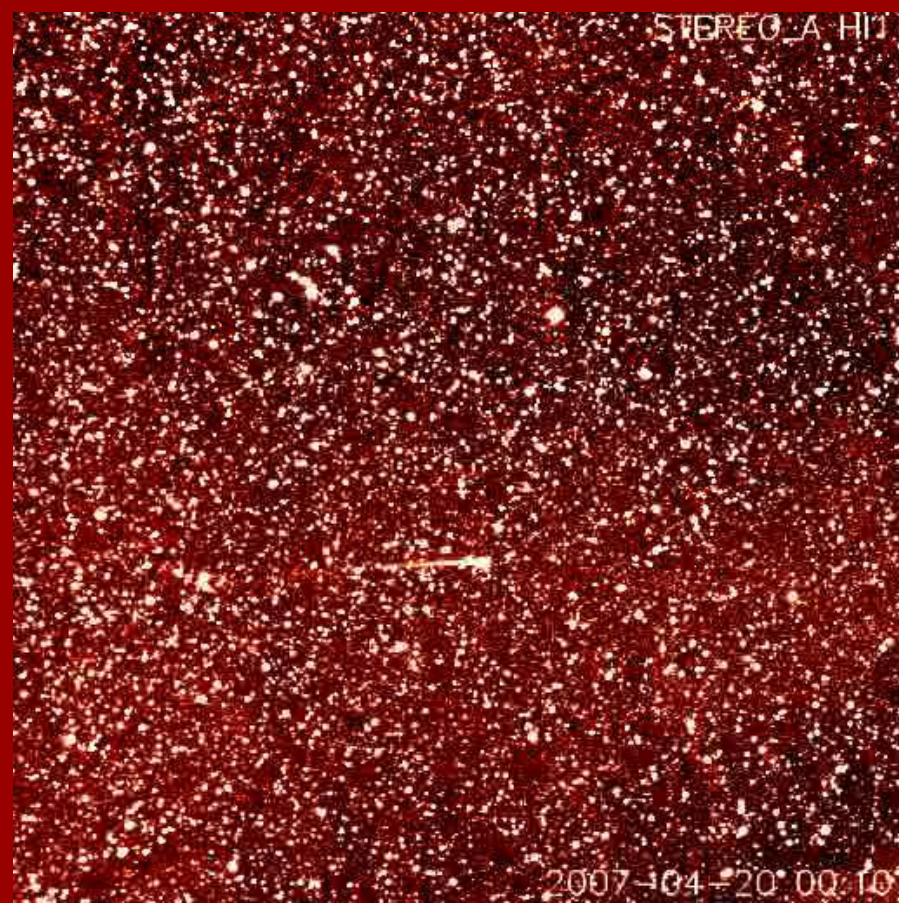
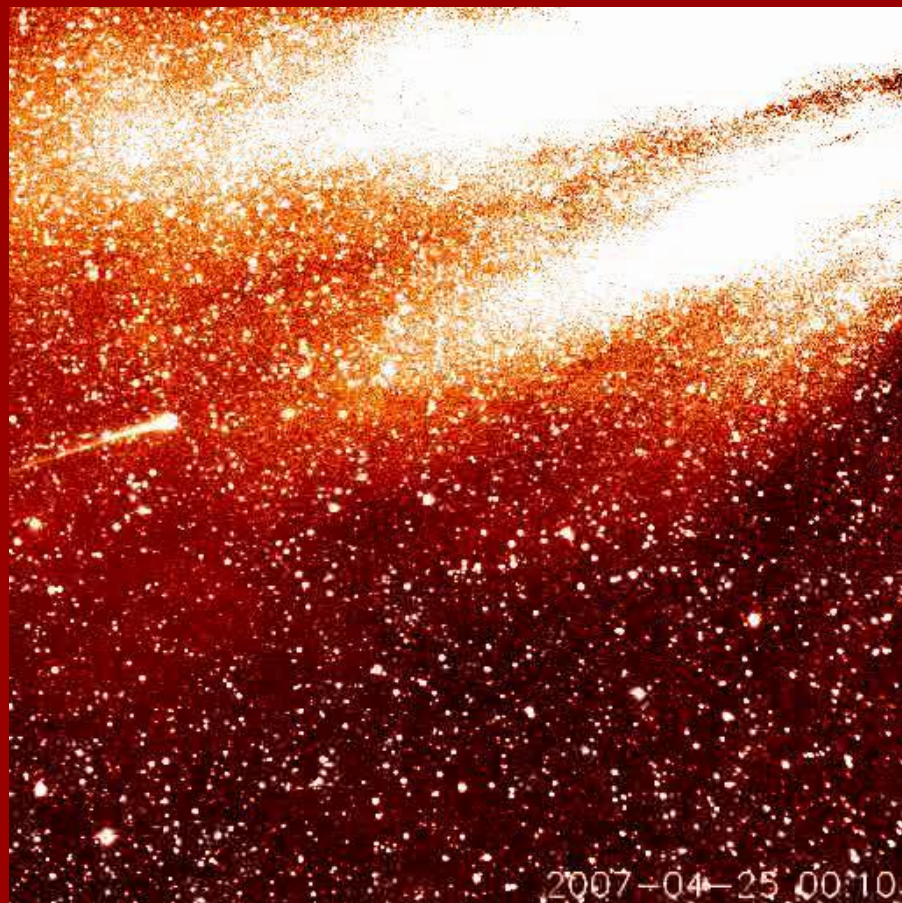
Cauda de gás ionizado. Ao interagir com o *Vento Solar*, que se move com alta velocidade, ela é arrastada por ele e adquire a forma retilínea.

Cauda de gás neutro e poeira. A *Radiação Solar* “arrasta” essa matéria na direção oposta do Sol.



Na aproximação do cometa as caudas estendem-se na direção contrária a do movimento do cometa. No afastamento ocorre o oposto.

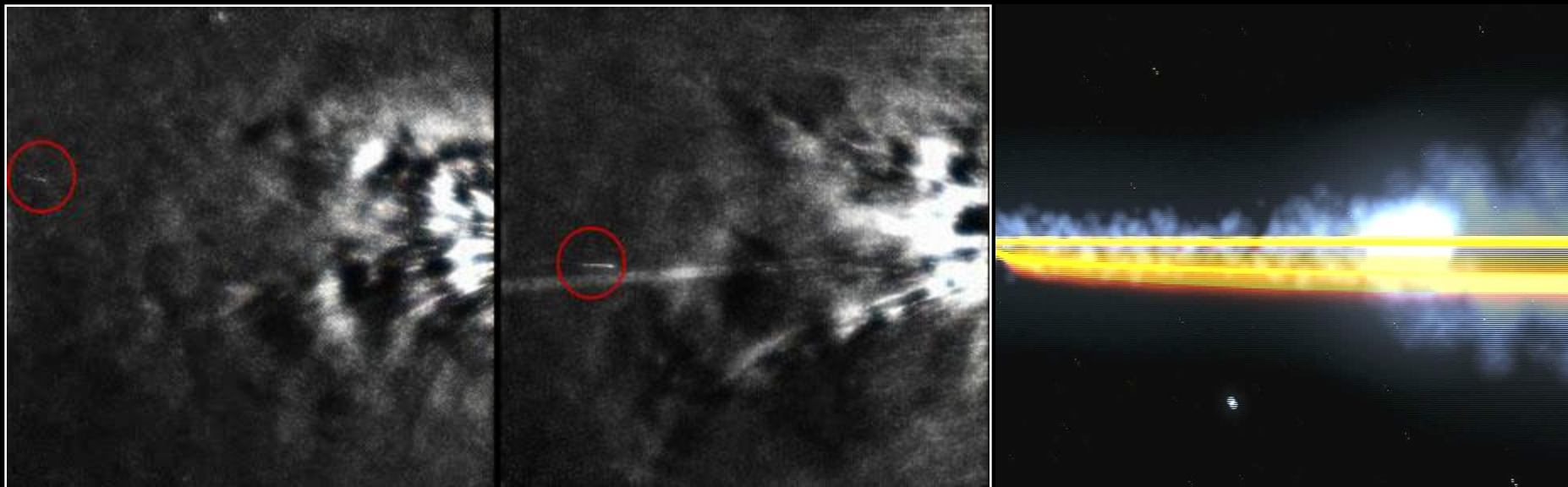
Tempestade solar interage com cauda ionizada



A colisão entre a EMC (Ejeção de Massa Coronal) e o gás ionizado fragmenta a cauda de plasma.

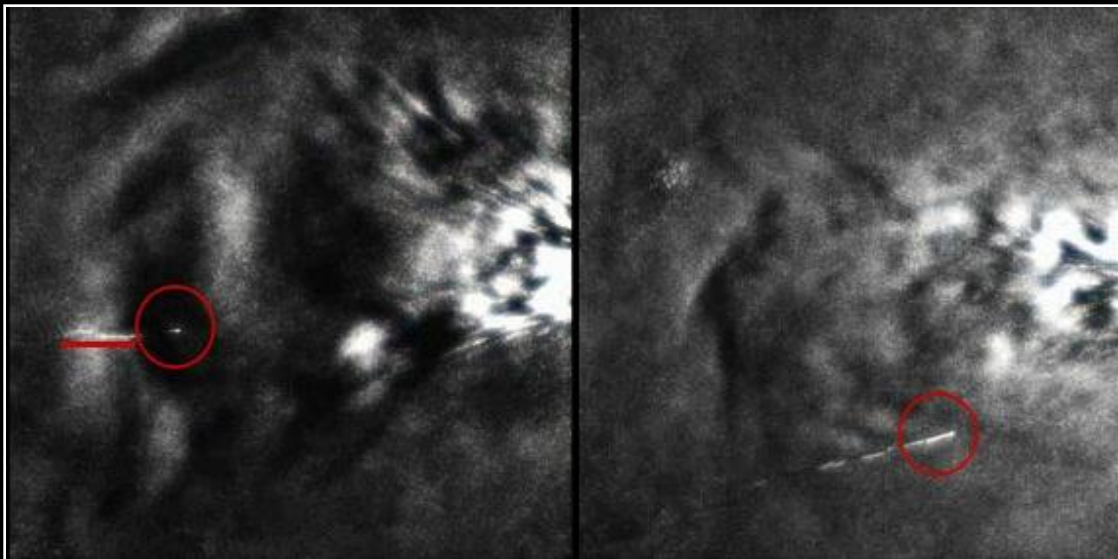
Tempestade solar interage com cauda ionizada

NASA's STEREO satellite - 20/04/2007



Causa possível:

a cauda foi rompida por um processo explosivo chamado "reconexão magnética": linhas magnéticas de polaridade opostas e próximas ao cometa se recombinaem liberando instantaneamente a energia magnética represada. Processo semelhante ocorre na magnetosfera terrestre durante tempestades geomagnéticas.

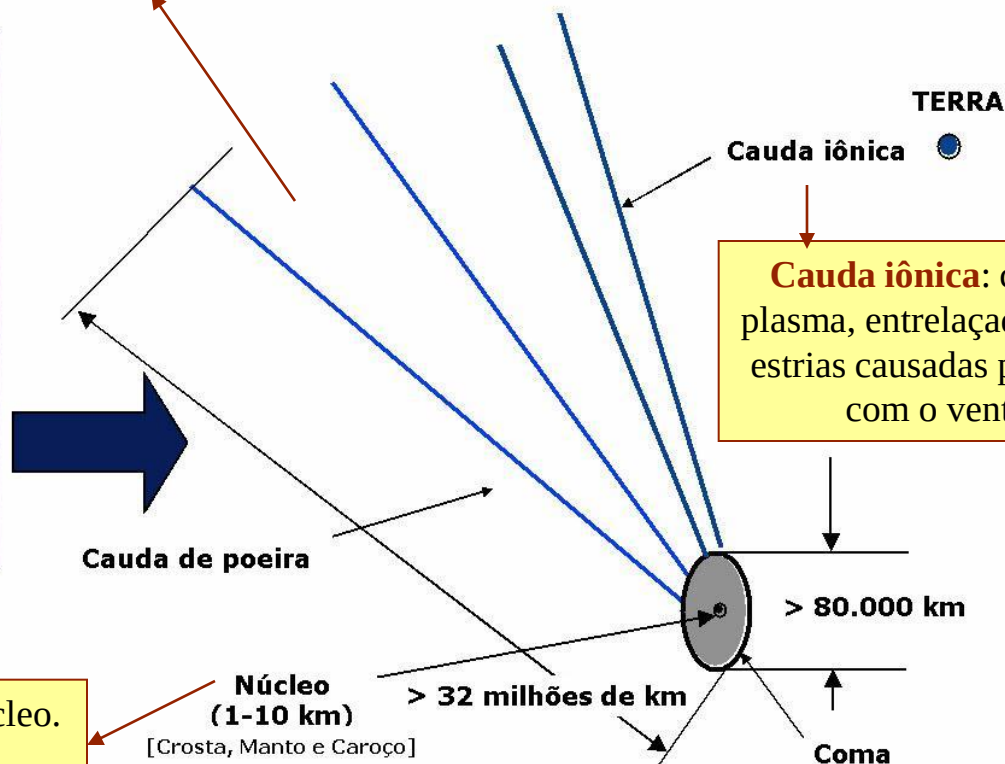


Estrutura dos cometas



Cauda de poeira: composta de poeira fina, expelida do núcleo juntamente com o gás

Nuvem de hidrogênio: envelope gasoso de baixíssima, com milhões de km de diâmetro, centrado no núcleo



Cauda iônica: composta de plasma, entrelaçada com raios e estrias causadas pela interação com o vento solar

Crosta: camada mais externa do núcleo. Processada pela volatilização.

Manto: camada mais densa que a crosta.

Caroço: material primitivo, inalterado. Não sabemos qual a natureza deles, ou mesmo se existem.

Coma: atmosfera composta de H_2O , CO_2 e outros gases neutros sublimados do núcleo

Cometa Hale-Bopp

- Visitou a região interna do Sistema Solar pela primeira vez.
- Foi um dos mais brilhantes das últimas décadas.
- Em parte isto deve-se à configuração geométrica Sol-Cometa-Terra, ele estava próximo da Terra quando atingia seu brilho máximo (outono de 1997).
- Em tamanho, seu núcleo equivale ao do cometa Halley.
- A imagem revela jatos radiais distintos de gás e poeira, formando caudas.



Composição

Espécies químicas mais abundantes

H_2O , NH_3 , CH_4 , CO_2 , C_2H_2 , CN , C_2 , C_3 ,
 CH , NH , NH_2 ,

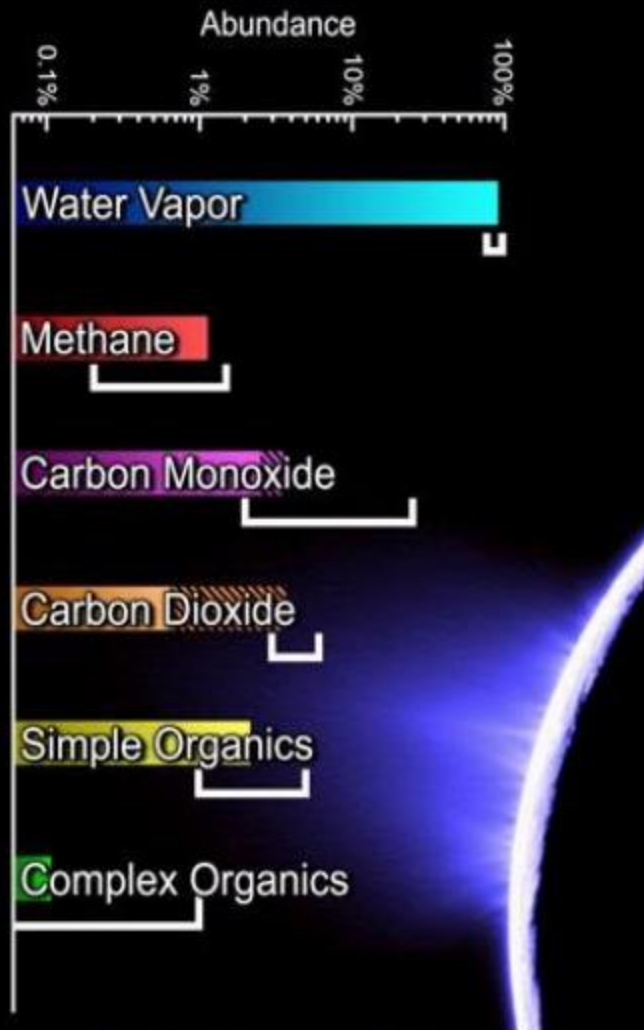
CO^+ , N_2^+ , OH^+ , CH^+ , H_2O

Poeira

Composição básica:

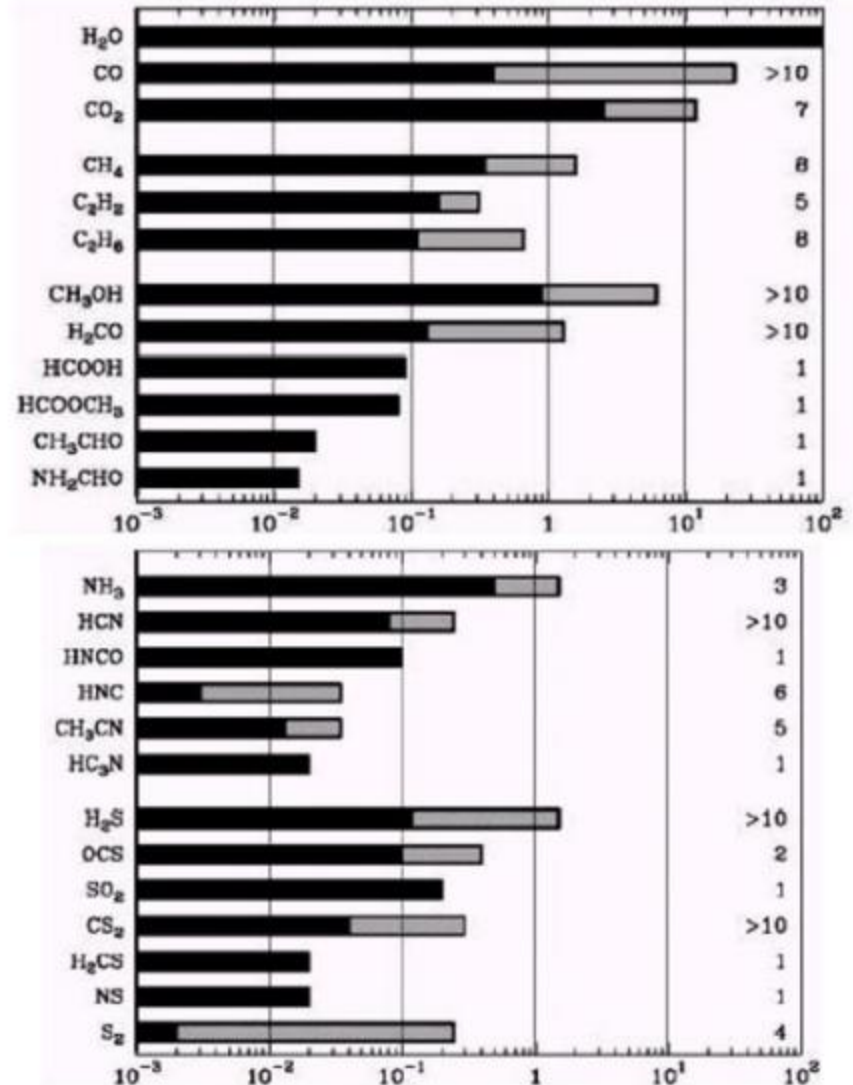
80% água, 16% CO , 4% CO_2 , e traços de amônia e metano

Cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko



Os cometas abasteceram a Terra com água e material orgânico

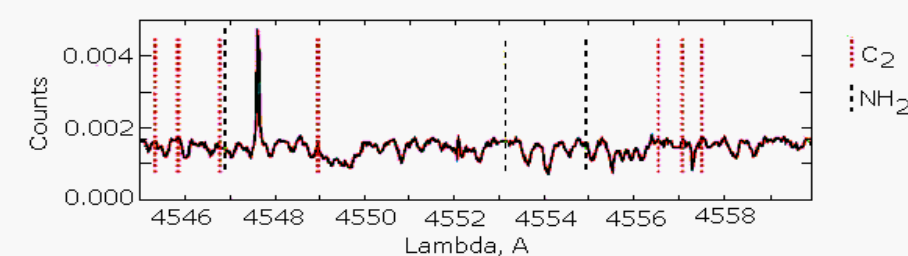
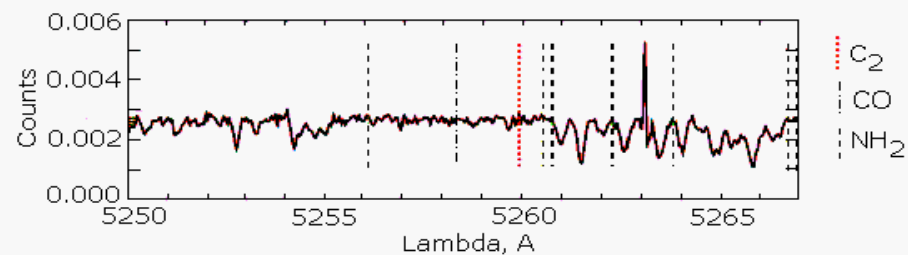
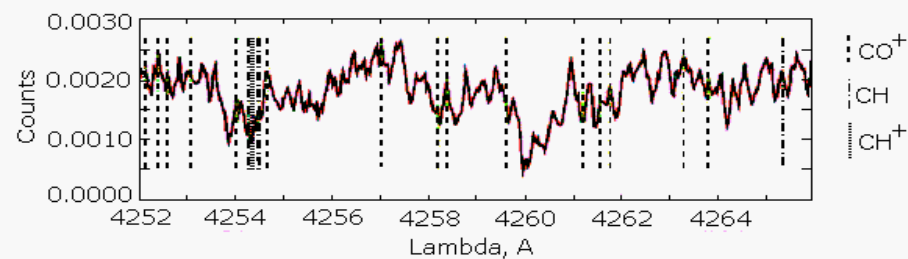
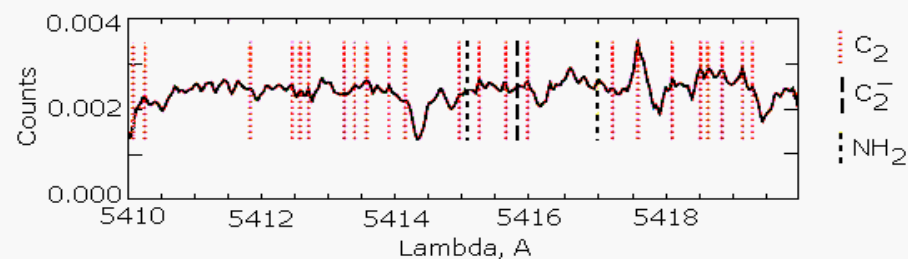
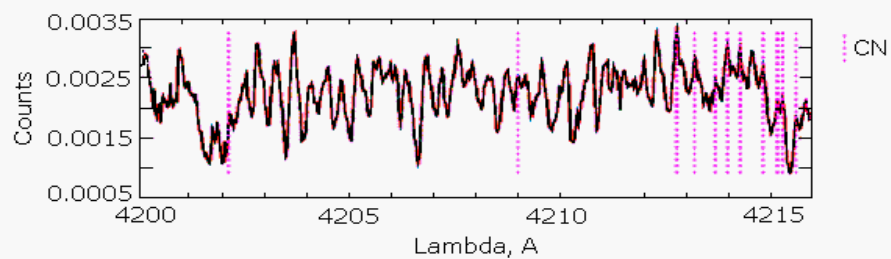
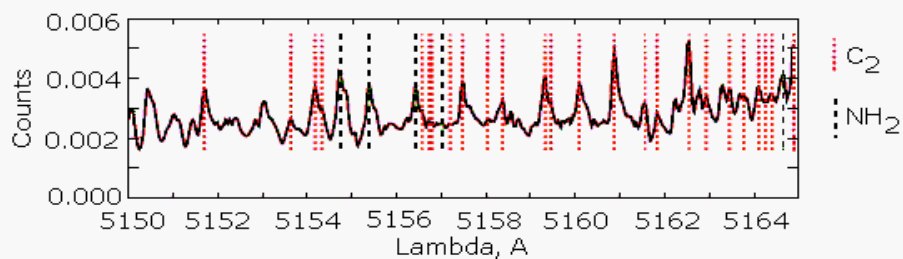
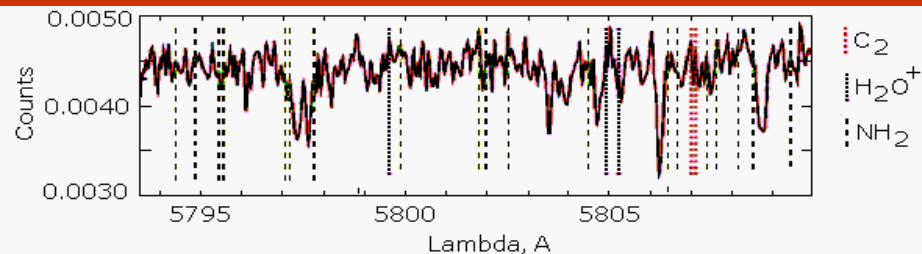
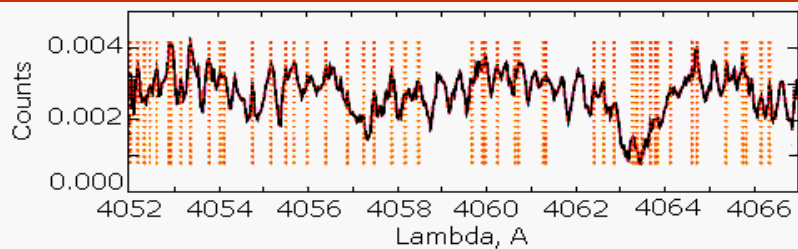
Composição química relativa à água
(barra cinza = diferenças entre cometas observados)



Espectro

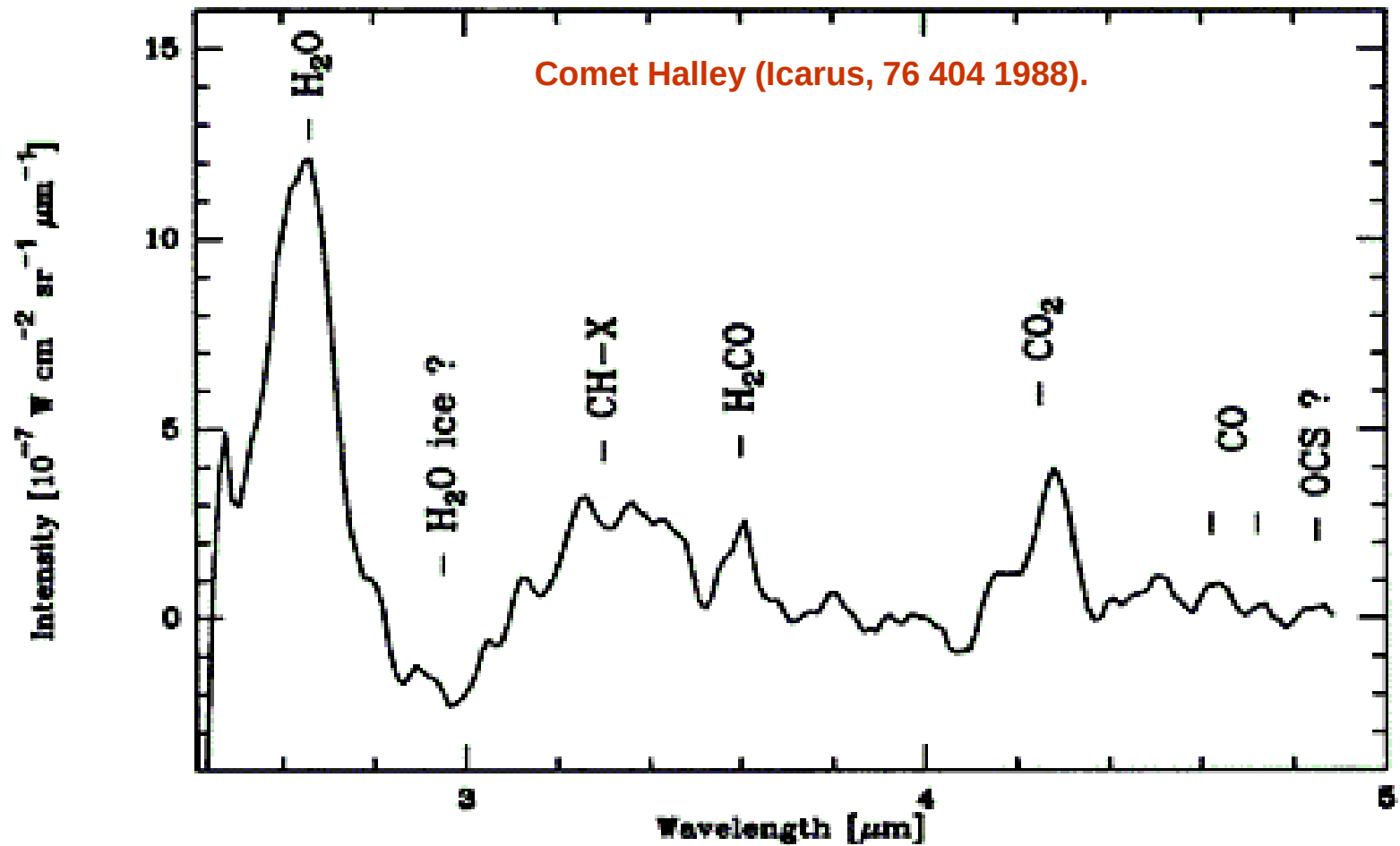
C/2000 WM1 (LINEAR)

Espécies: C_2 , C_3 , CO , CH , CN , NH_2 , C_2^- , H_2O^+ , CH^+ , CO^+



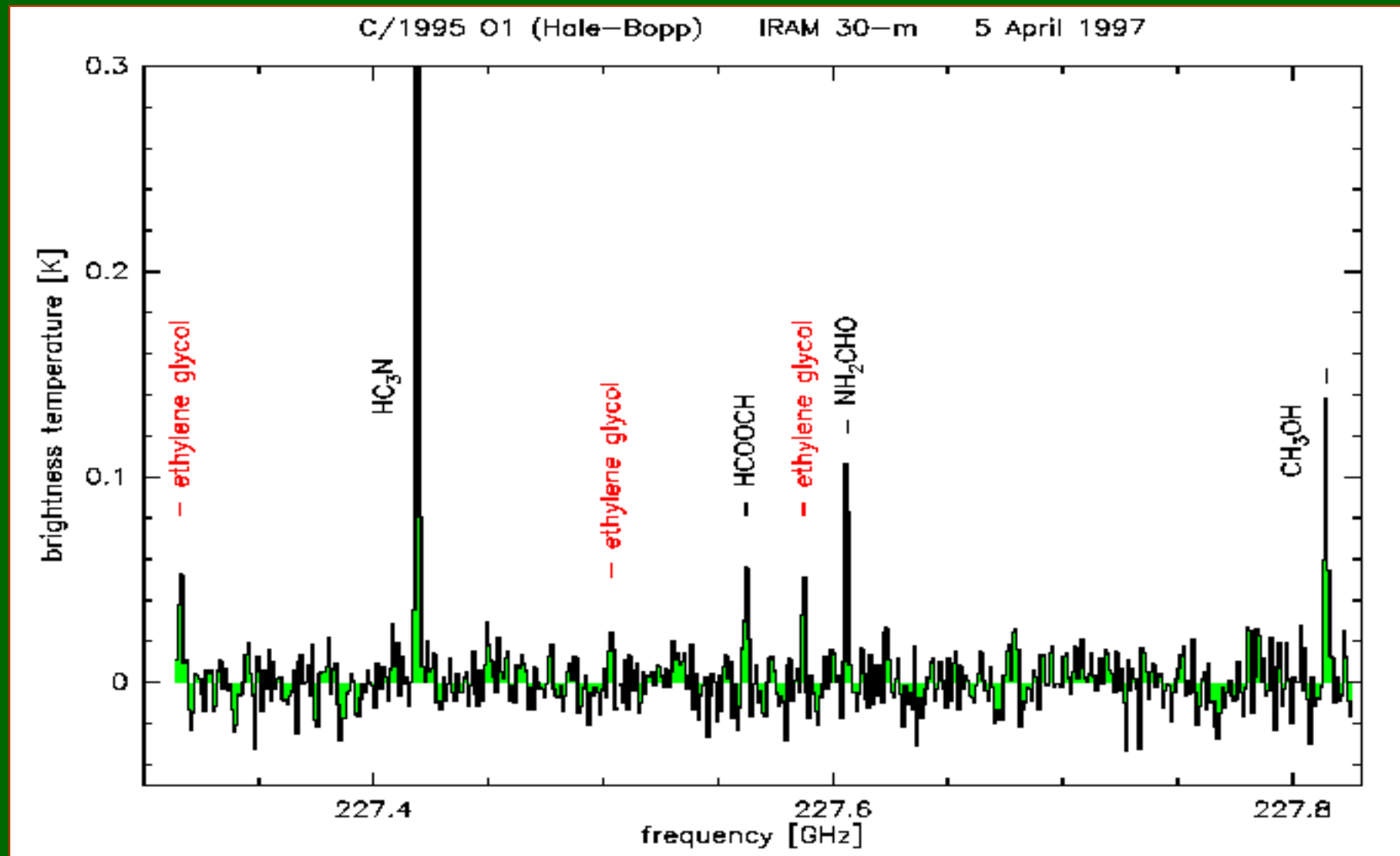
Espectro

ESPECTRO DE EMISSÃO NO INFRAVERMELHO

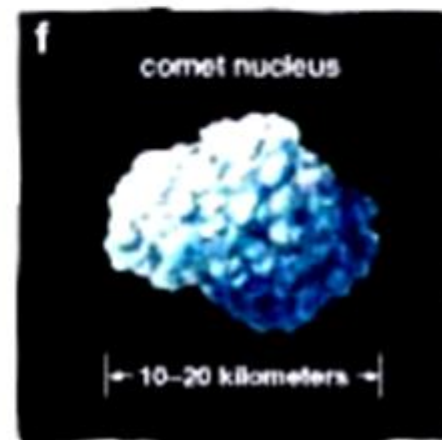
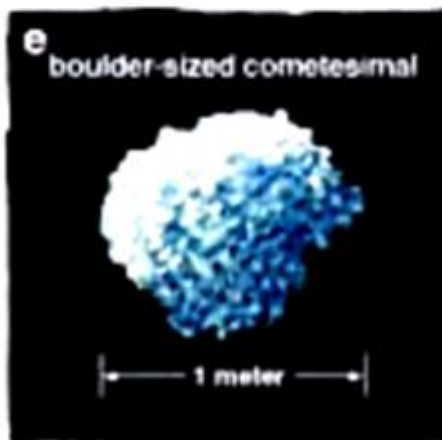
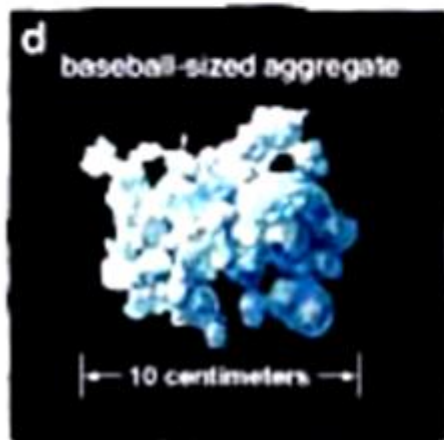
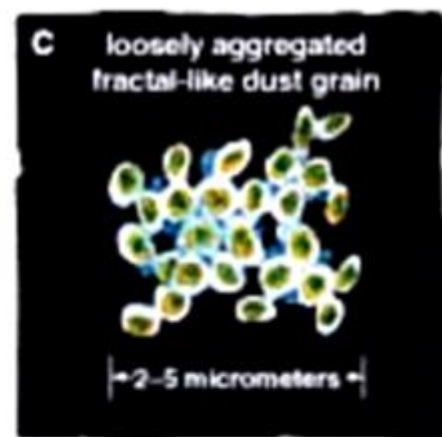
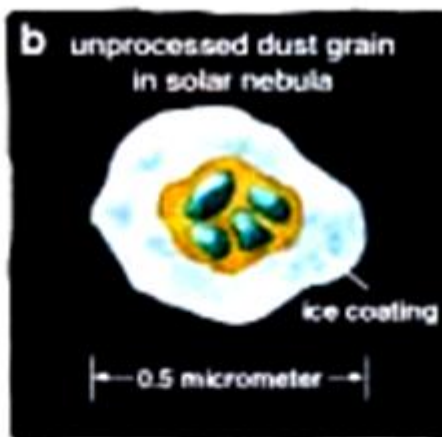
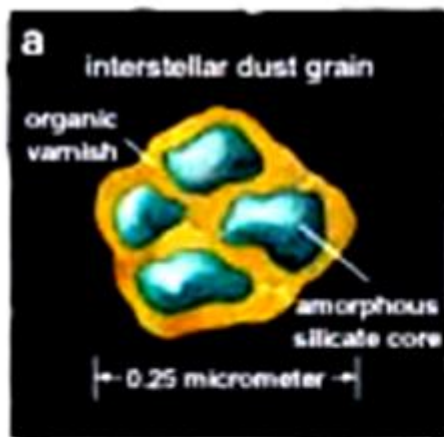


Espectro

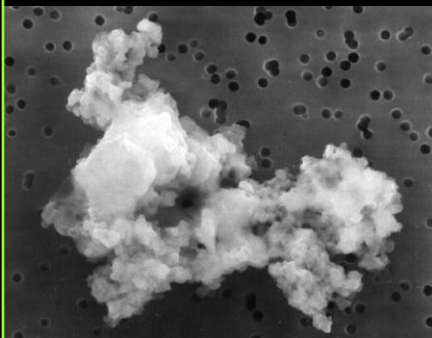
ESPECTRO DE EMISSÃO EM RÁDIO



Constituição dos cometas



Grão estratosférico de 10 microns

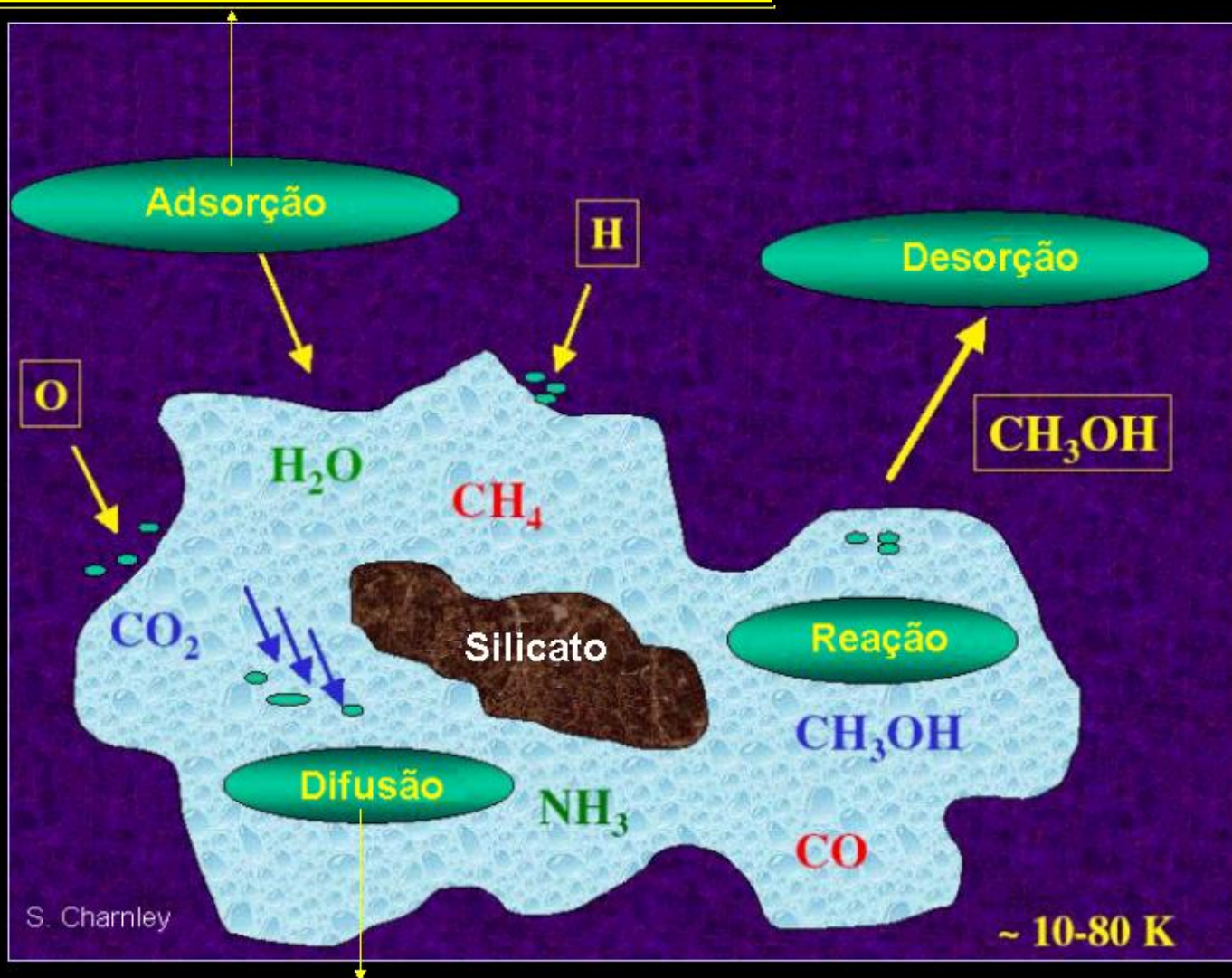


A **visão tradicional** da formação de cometas propõe que os materiais das partes mais afastadas da nebulosa solar primitiva se agregaram em componentes maiores, enquanto orbitavam o proto-Sol (antes de ser uma estrela). **Processo:** (a) o grão de poeira interestelar é composto de núcleos de silicato amorfo e uma matriz de moléculas orgânicas (já presente na nebulosa solar que colapsou); (b) muitos desses grãos adquirem cobertura de gelo; (c) gradativamente eles crescem como partículas de poeira tipo-fractal, através de colisão e colagem; (d) essa agregação de partículas eventualmente produz cometésimos; (e) esses cometésimos continuam crescendo; (f) até formarem um objeto com as dimensões de um cometa.

(*American Scientist* 89)

Poeira interestelar

processo pelo qual átomos, moléculas ou íons são retidos na superfície de sólidos através de interações de natureza química ou física.



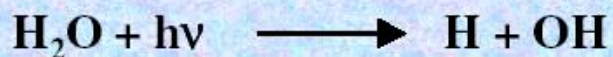
migração de átomos ou moléculas num sistema físico (sólido, líquido ou gás), em geral devido a sua própria agitação térmica, muitas vezes também causada pela influência de um gradiente de temperatura, pressão, ou por um potencial químico ou elétrico.

THE COMA

Molecules are liberated from the nucleus by solar heating and sublimation



Molecules are destroyed by **photodissociation** & **photoionization**



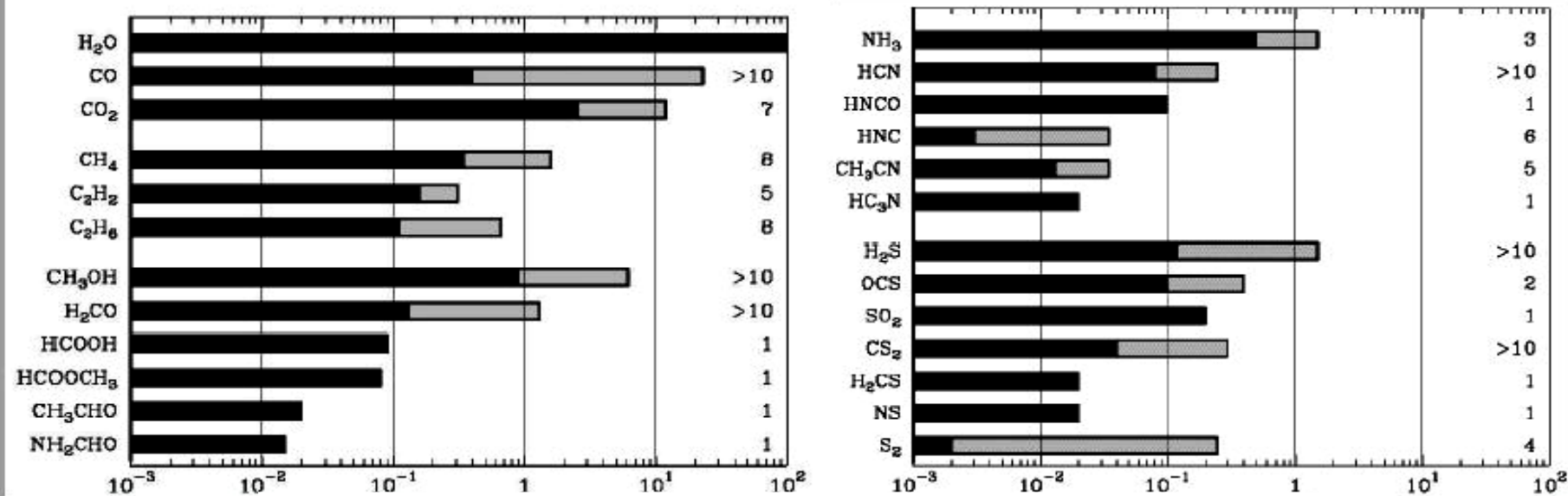
Nucleus molecules are referred to as the **“parent molecules”**

The fragments produced by the absorption of a photon are called **“daughters”**

S. Charnley

Composição química dos cometas

(a barra cinza indica a escala de medida – variação entre cometas)



Abundâncias (% relativo à água)

Moléculas do Meio Interestelar

Molecular inventory

2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
H ₂	C ₃	c-C ₃ H	C ₅	C ₅ H	C ₆ H	CH ₃ C ₃ N	CH ₃ C ₄ H	CH ₃ C ₅ N?	HC ₉ N	C ₆ H ₆	HC ₁₁ N
AlF	C ₂ H	I-C ₃ H	C ₄ H	I-H ₂ C ₄	CH ₂ CHCN	HCOOCH ₃	CH ₃ CH ₂ CN	(CH ₃) ₂ CO			
AlCl	C ₂ O	C ₃ N	C ₄ Si	C ₂ H ₄	CH ₃ C ₂ H	CH ₃ COOH	(CH ₃) ₂ O	HOCH ₂ CH ₂ OH			
C ₂	C ₂ S	C ₃ O	I-C ₃ H ₂	CH ₃ CN	HC ₅ N	C ₇ H	CH ₃ CH ₂ OH	NH ₂ CH ₂ COOH			
CH	CH ₂	C ₃ S	c-C ₃ H ₂	CH ₃ NC	HCOCH ₃	H ₂ C ₆	HC ₇ N				
CH ⁺	HCN	C ₂ H ₂	CH ₂ CN	CH ₃ OH	NH ₂ CH ₃	CH ₂ OHCHO	C ₈ H				
CN	HCO	CH ₂ D ⁺ ?	CH ₄	CH ₃ SH	c-C ₂ H ₄ O	C ₂ H ₆					
CO	HCO ⁺	HCCN	HC ₃ N	HC ₃ NH ⁺	CH ₂ CHOH						
CO ⁺	HCS ⁺	HCNH ⁺	HC ₂ NC	HC ₂ CHO							
CP	HOC ⁺	HNCO	HCOOH	NH ₂ CHO							
CSi	H ₂ O	HNCS	H ₂ CHN	C ₅ N							
HCl	H ₂ S	HOCO ⁺	H ₂ C ₂ O								
KCl	HNC	H ₂ CO	H ₂ NCN								
NH	HNO	H ₂ CN	HNC ₃								
NO	MgCN	H ₂ CS	SiH ₄								
NS	MgNC	H ₃ O ⁺	H ₂ COH ⁺								
NaCl	N ₂ H ⁺	NH ₃									
OH	N ₂ O	SiC ₃									
PN	NaCN	CH ₃									
SO	OCS										
SO ⁺	SO ₂										
SiN	c-SiC ₂										
SiO	CO ₂										
SiS	NH ₂										
CS	H ₃ ⁺										
HF	SiCN										
SH	AINC										
FeO?	H ₂ O ⁺										
SiH											

Physics World, Charnley et al. 2003

Astronomers have made a list of 131 molecules that have been discovered in interstellar space, which range from simple two-atom species (left) to complex molecules that contain up to 13 atoms. Many of these play important roles in terrestrial biochemistry, and several organic classes are represented: acids, aldehydes, ketones, alcohols, ethers, esters and pre-sugars. Some of these molecules, which include structural isomers such as HCN and HNC, are also present in meteorites and in comets. Many of the hydrocarbons that contain multiple carbon atoms exist as long carbon chains. The smallest member of the cyanopolyynes series – cyanoacetylene (HC₃N) – is ubiquitous in molecular clouds, and another member – cyanodecapentayne (HC₁₁N) – is the largest molecule that has been unambiguously identified in the interstellar medium. A few small ring molecules are present in the list but many larger organic compounds await detection in space. The present authors, for example, are currently using the Arizona Radio Observatory 12 m and Green Bank telescopes to search for ring compounds (PAHs) containing nitrogen. Table courtesy of Al Wootten and updated from www.astrochemistry.net.

Missões cometárias

1P/Halley

[Giotto 1985]

1a. observação por sonda espacial
(danificada pela poeira).
Período ~75 a.;



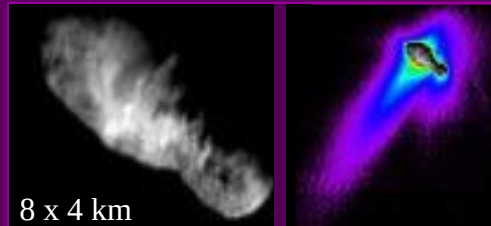
19P/Borrelly

[Deep Space 1 1999]

visita asteroide 9969 Braille, tipo Vesta, um dos maiores do cinturão e que aproxima-se da Terra.

1a. observação espacial com alta resolução

Período ~6,7 a



81P/Wild 2

[Stardust 1999]

1a. coleta de material da coma e melhor imagem (jan/2004).
Cápsula com material será recuperada em jan/2006.

Cometa NOVO,
capturado
por Júpiter
em 1974
Período ~ 6,4 a



Cometa 9P/Tempel 1 [Deep Impact 2005]:

1a. exploração de composição do núcleo

Impacto:

4/7/2004

Período:

~ 5,5 a.

Tamanho:

4 x 14 km ?



Cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko

[Rosetta 2004 – 2015]

1o. registro in loco da atividade

Pouso em nov/2014.

Registro até dez/2015.

Período ~6,6 a.

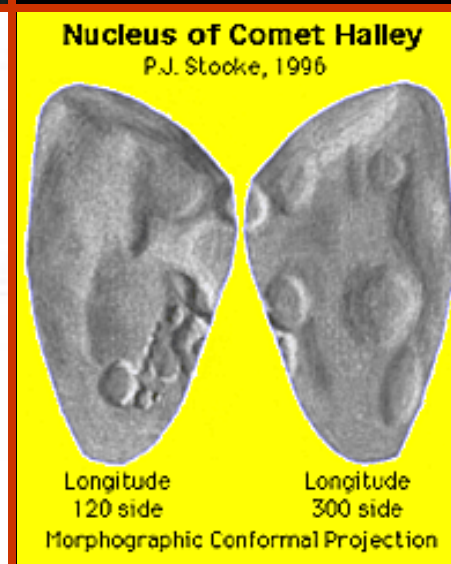
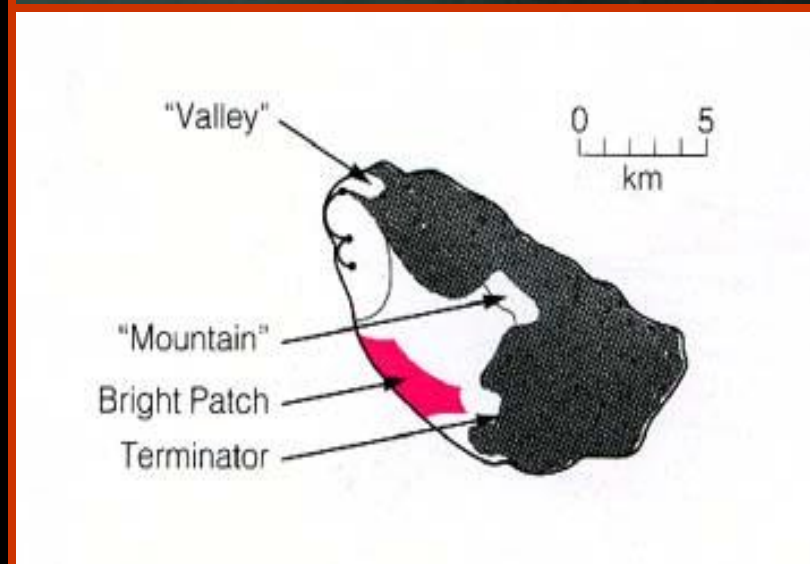
Tamanho: 4 km



o núcleo do 1/P Halley

Imagem composta de 60 exposições obtidas pela sonda europeia Giotto (1986). Detalhes de superfície são vistos com clareza, assim como jatos brilhantes de gás e poeira, emitidos na direção do Sol.

Esquema do núcleo, baseado nas imagens



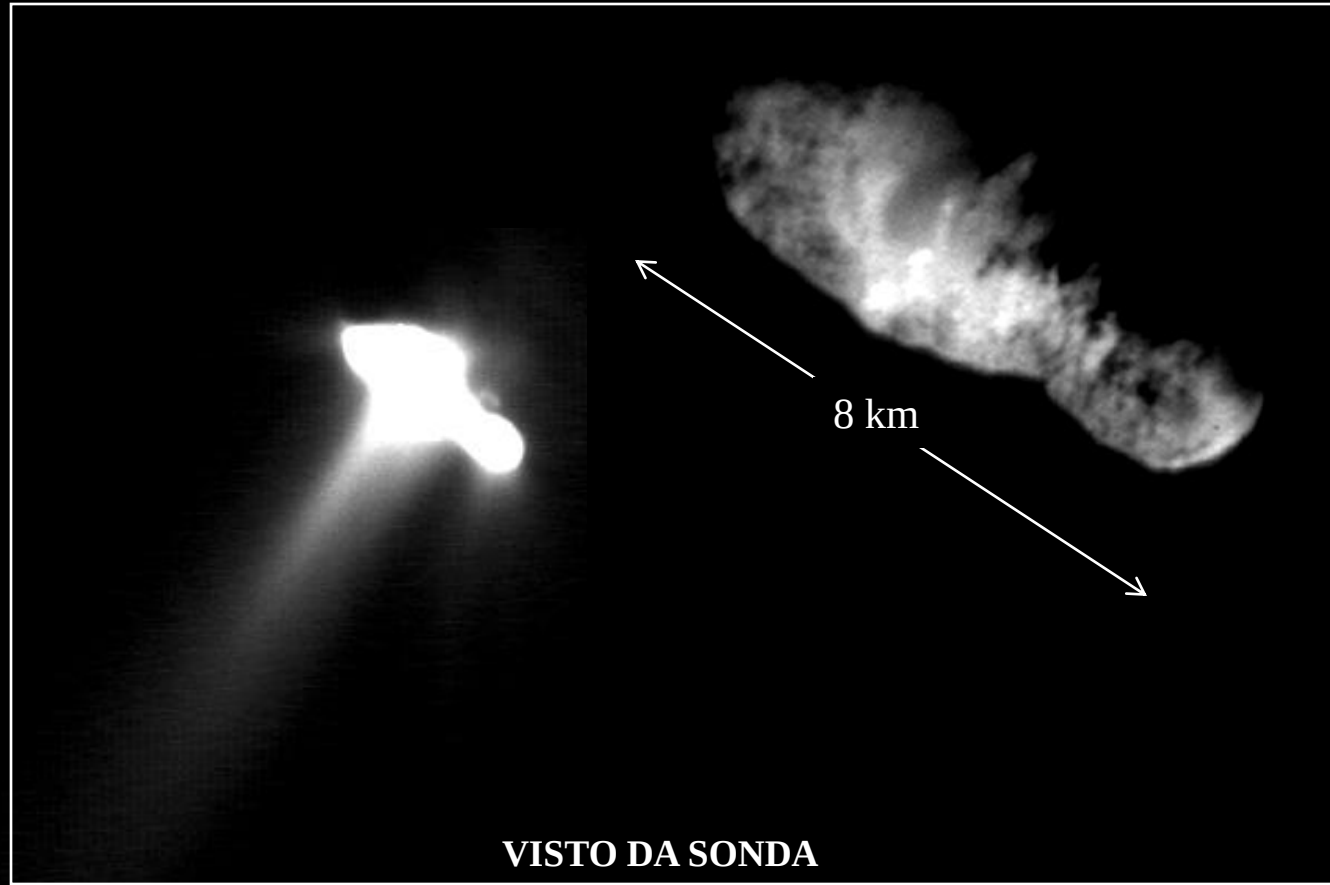
Missões cometárias

o núcleo do 19/P Borrelly

VISTO DO SOLO

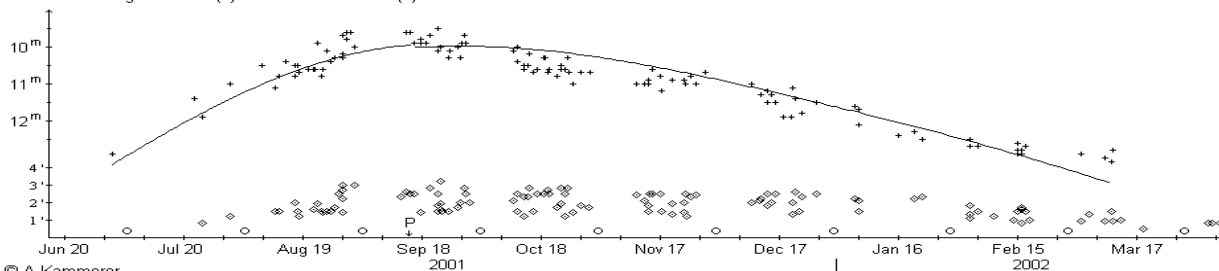


Sonda Deep Space 1, NASA



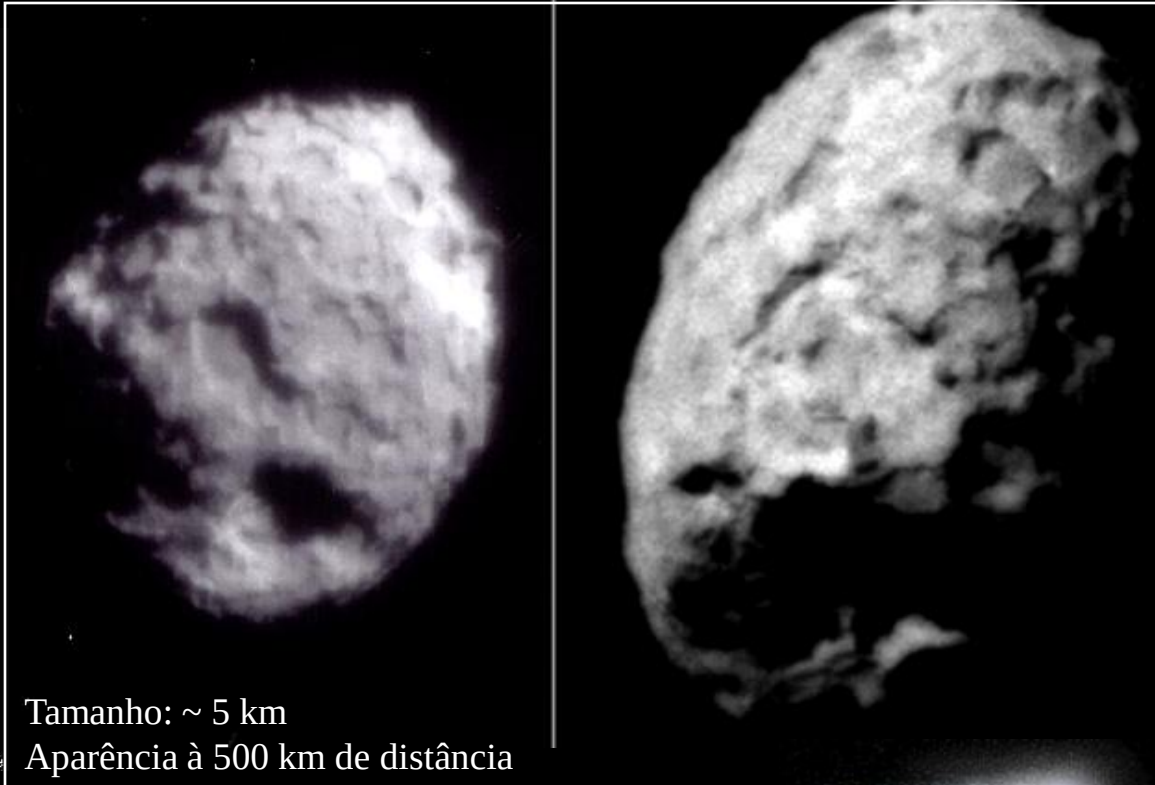
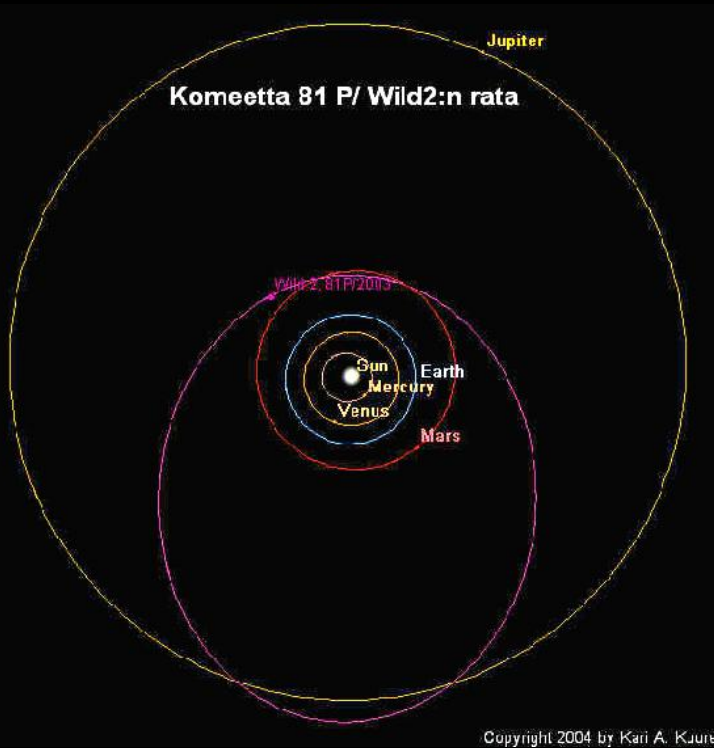
Comet 19P/Borrelly

Total visual magnitude m1 (+) and Coma diameter (◊)



Missões cometárias

O núcleo do cometa 81P/ Wild 2



Stardust

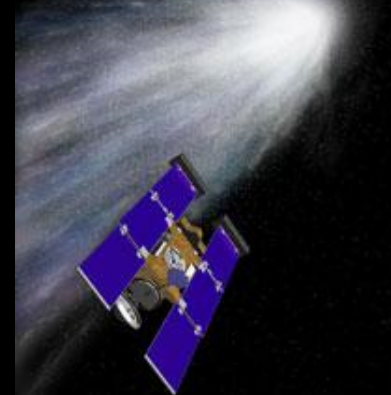
(NASA)

Lançada em 07/02/99;

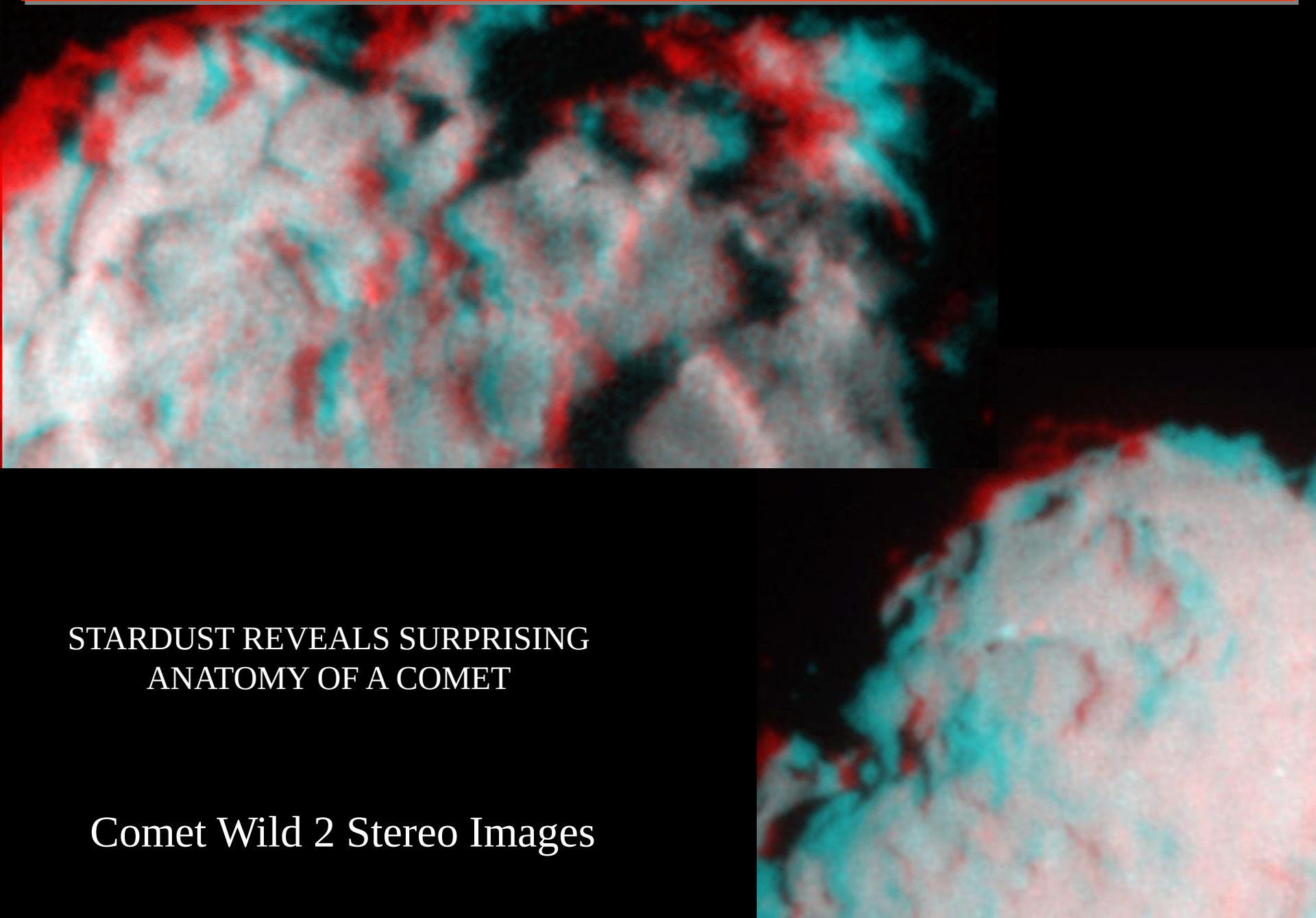
Encontro em 02/01/04;

[coletou material da coma]

Retorno à Terra em 15/01/06



Cometa 81P/Wild 2



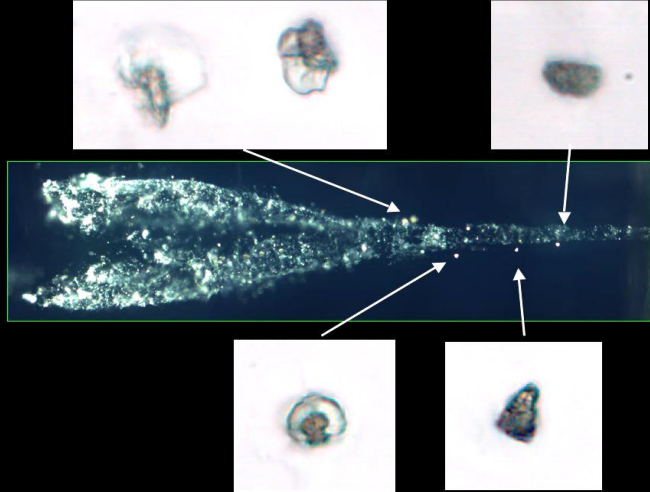
STARDUST REVEALS SURPRISING
ANATOMY OF A COMET

Comet Wild 2 Stereo Images

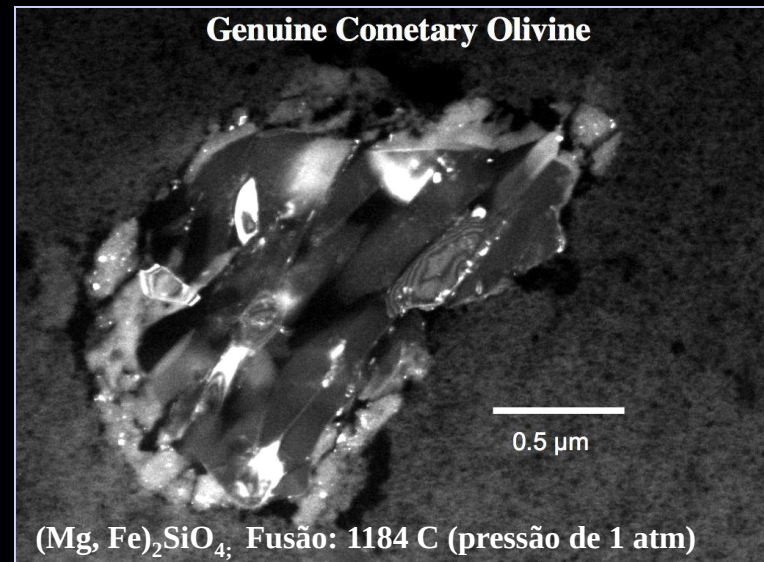
Missões cometárias

a poeira do cometa 81P/ Wild 2

Poeira aprisionada no aparato de gel



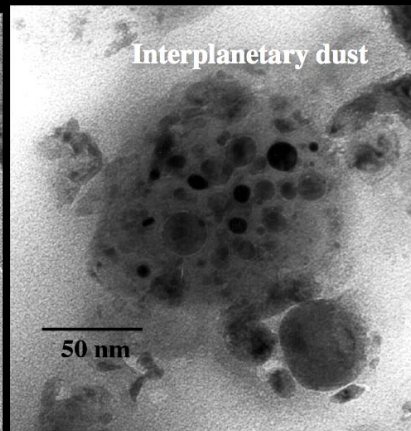
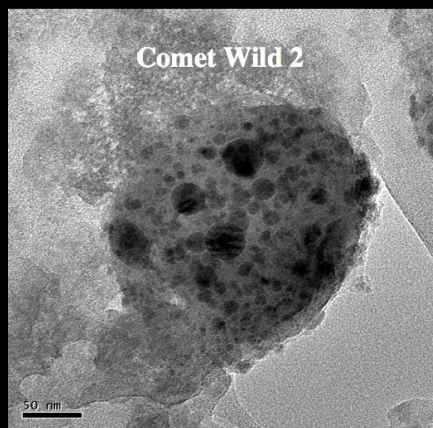
Genuine Cometary Olivine



$(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$; Fusão: 1184 C (pressão de 1 atm)

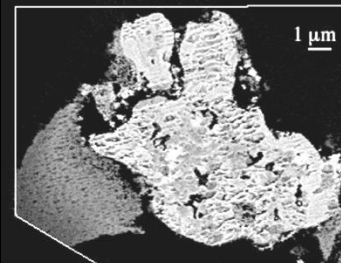
GEMS ?

(Glass with Embedded Metal and Sulfides)

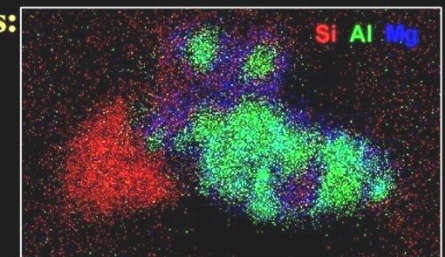


SEM-EDS X-ray Maps: overlay maps

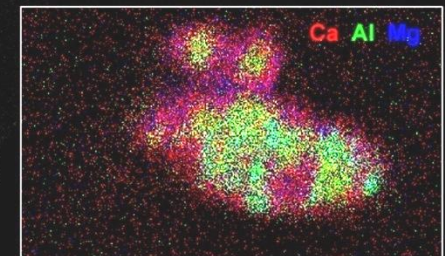
"Easter" C054.4.25.0
potted butt in acrylic



BSE image, 4.0 kV, high contrast



EDS X-ray maps, 10 kV



Missões cometárias

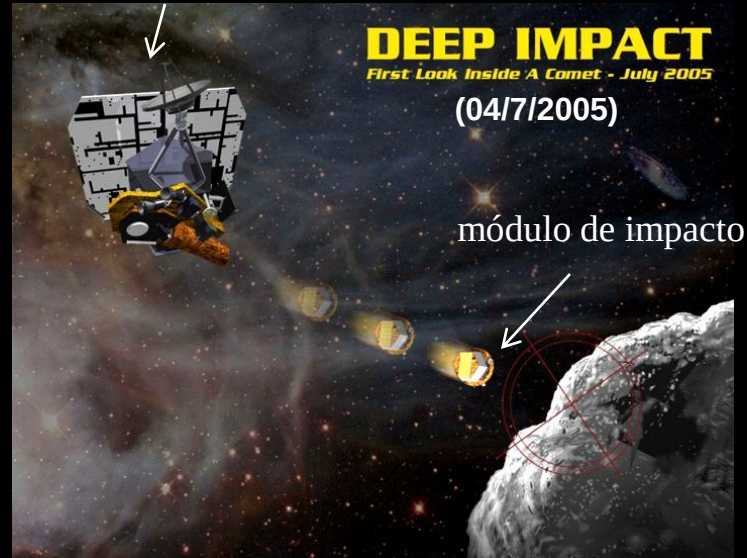
o núcleo do 9/P Tempel 1

visão do módulo de impacto



http://deepimpact.umd.edu/flash/di_science.html

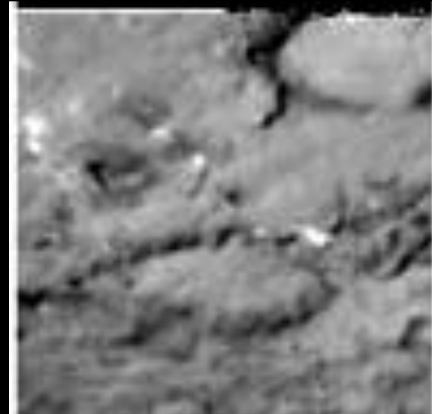
módulo de vôo



visão do módulo de vôo

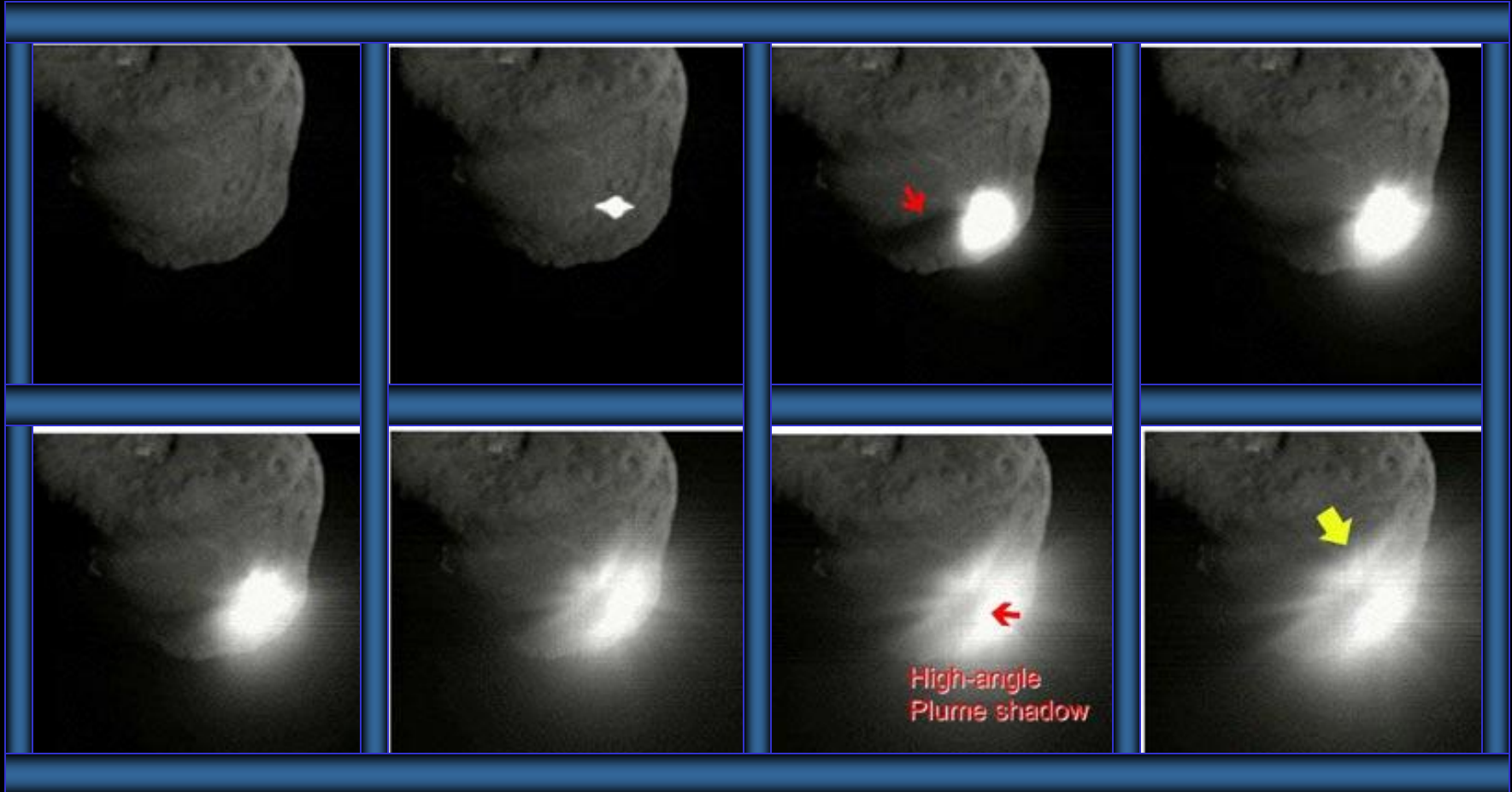


última imagem:
a 30 km do cometa,
1s antes do impacto



Missões cometárias

o núcleo do 9/P Tempel 1



APROXIMAÇÃO VISTA PELO MÓDULO DE IMPACTO

IMPACTO VISTO DO MÓDULO DE VÔO

Sequência de imagens mostrando etapas do impacto (4/7/2005, 1:52h).

Seta vermelha indica sombreamento devido à poeira.

Seta amarela indica zona evitada de impacto

Missões cometárias

o núcleo do 9/P Tempel 1



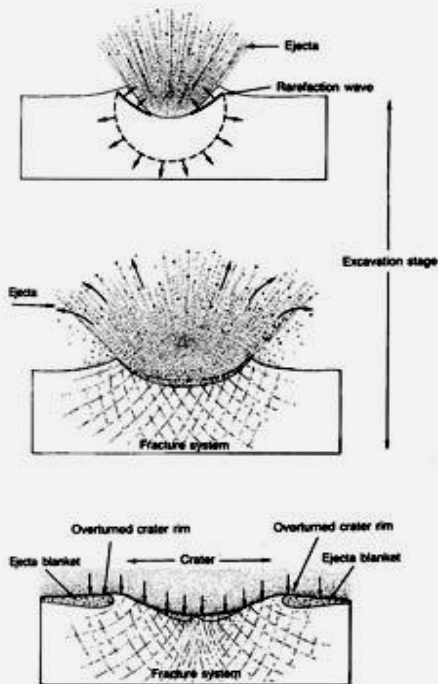
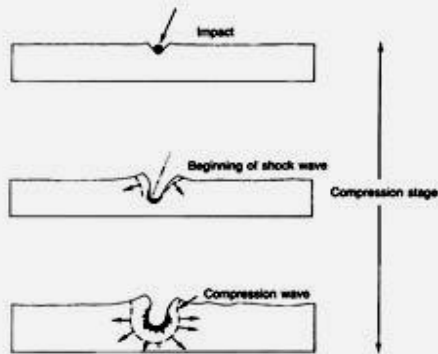
Sequência de imagens mostrando etapas do impacto (4/7/2005, 1:52h).

Seta vermelha indica sombreamento devido à poeira.

Seta amarela indica zona evitada de impacto

Crateras: o que podem nos informar?

Dimensões esperadas: 100 m de diâmetro e 25 m de profundidade



O que sabemos sobre formação de crateras?

Mecanismo é bem conhecido: tamanho, profundidade e forma da cratera, velocidade do impacto, natureza do alvo e do projétil, são grandezas correlacionadas.

Experimentos revelam que em regime de hipervelocidade (kms/s) o ângulo de ejeção depende da porosidade do alvo: maior a porosidade, maior ângulo da trajetória (relativamente à superfície).

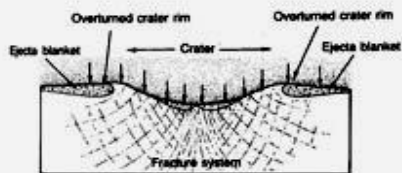
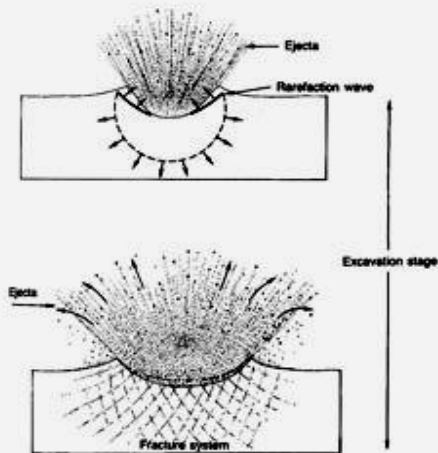
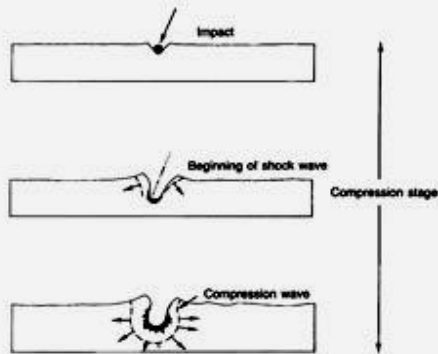


O que objetiva o impacto?

- Observar como se forma a cratera
 - Medir profundidade e diâmetro
 - Medir composição do interior e dos jatos
 - Determinar as mudanças no regime de degasamento, decorrentes do impacto
-
- Os 1ºs jatos refletem material das camadas superficiais, e atingem distâncias maiores na superfície do cometa.
 - Qto. mais tardios os jatos, mais profundas as regiões de origem e menores as distâncias percorridas na superfície.
 - A análise comparativa dos jatos pode desvendar a estrutura interna do núcleo.

Crateras: o que podem nos informar?

Dimensões esperadas: 100 m de diâmetro e 25 m de profundidade



O que sabemos sobre formação de crateras?

Mecanismo é bem conhecido: tamanho, profundidade e forma da cratera, velocidade do impacto, natureza do alvo e do projétil, são grandezas correlacionadas.

Experimentos revelam que em regime de hipervelocidade (kms/s) o ângulo de ejeção depende da porosidade ao alvo: maior a porosidade, maior ângulo da trajetória (relativamente à superfície).

A observação dos jatos permite determinar com precisão massa e densidade do núcleo.

$$\left. \begin{array}{l} F = ma \\ F = G \frac{m M}{r^2} \end{array} \right\} \quad ma = G \frac{m M}{r^2} \quad \Rightarrow \quad M = \frac{a r^2}{G}$$

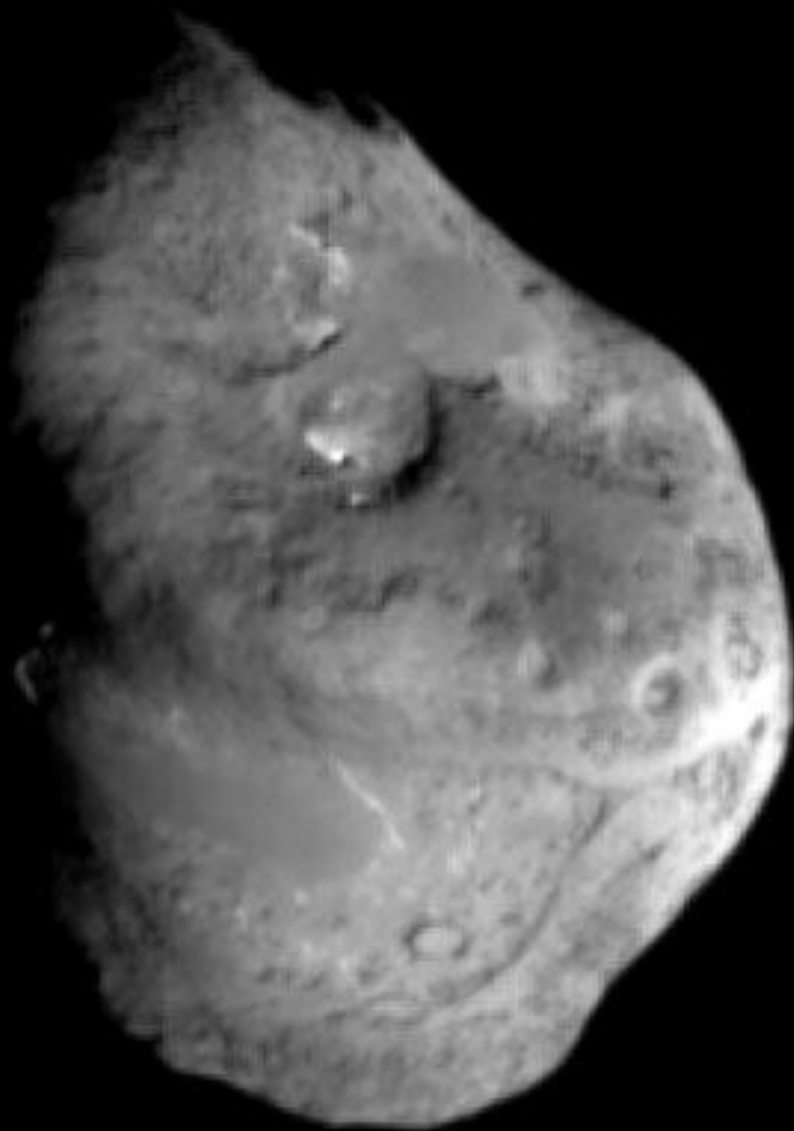
M – massa do cometa

m – massa do bloco

r – distância do bloco ao centro do cometa

a – aceleração do bloco

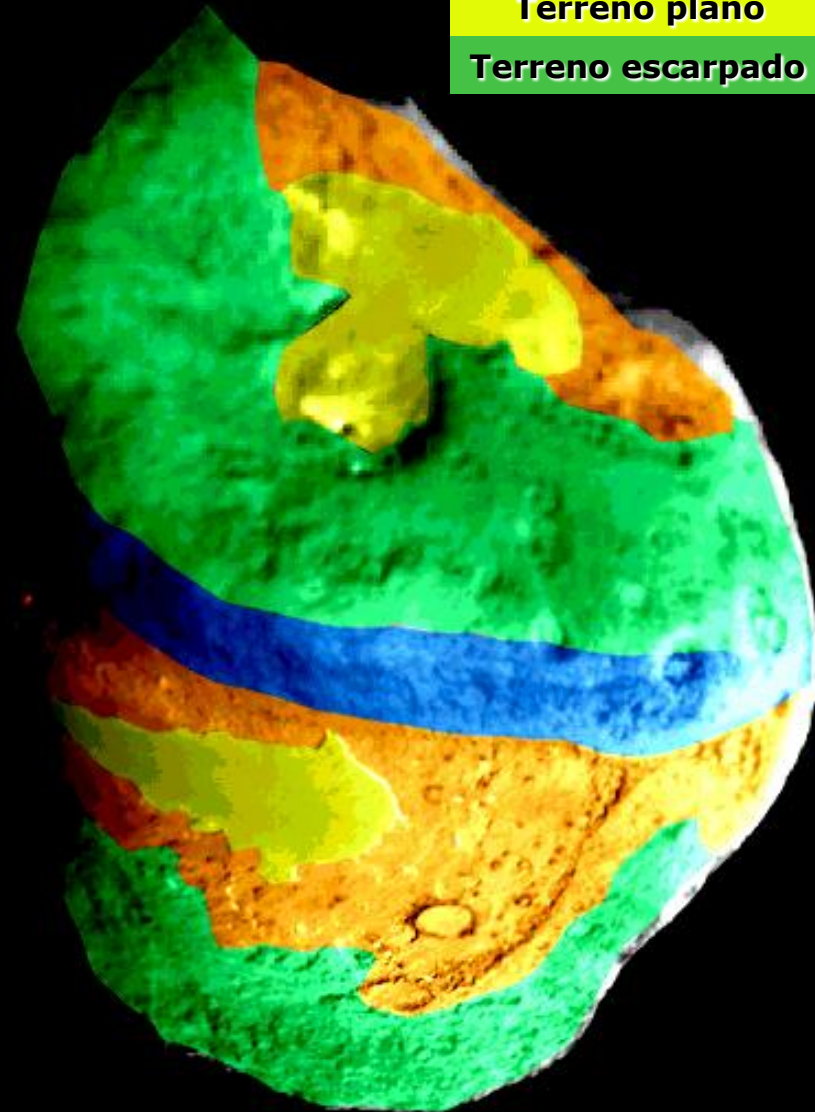
Cometa 9P/Tempel 1: Mapa geológico



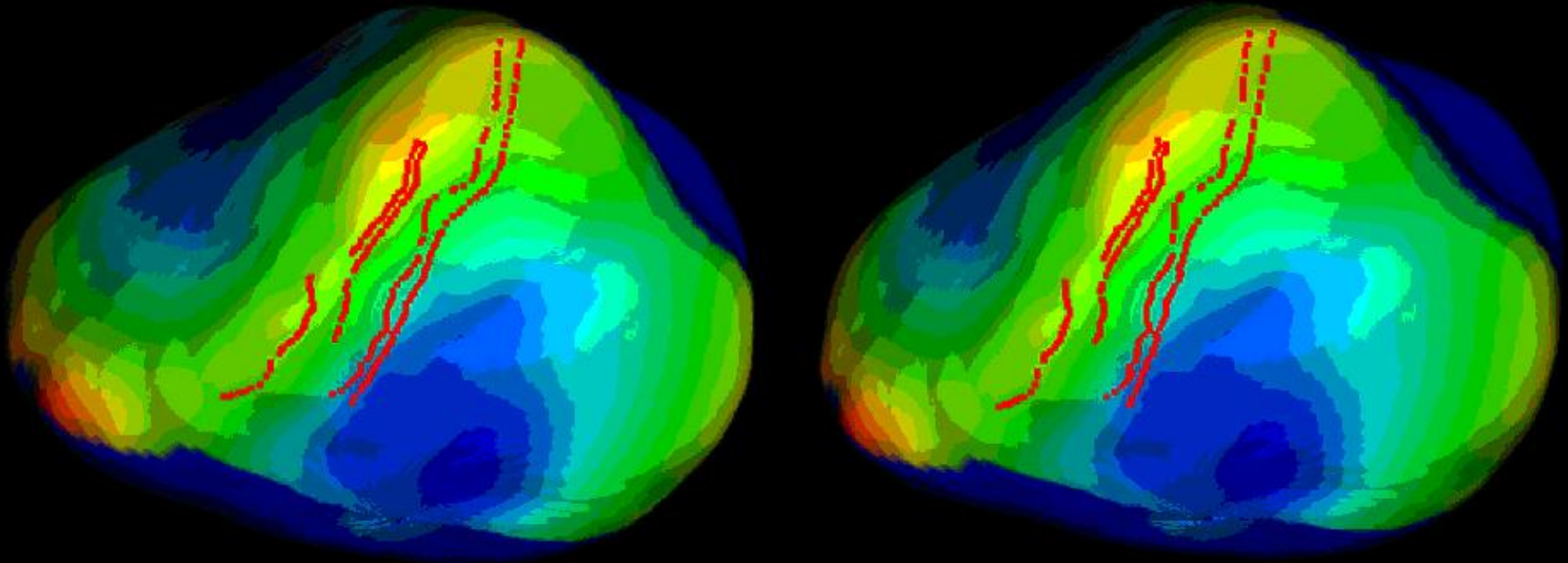
Camadas espessas

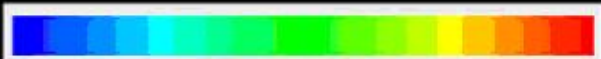
Terreno plano

Terreno escarpado



9P/Tempel 1: visão 3D do modelo topológico

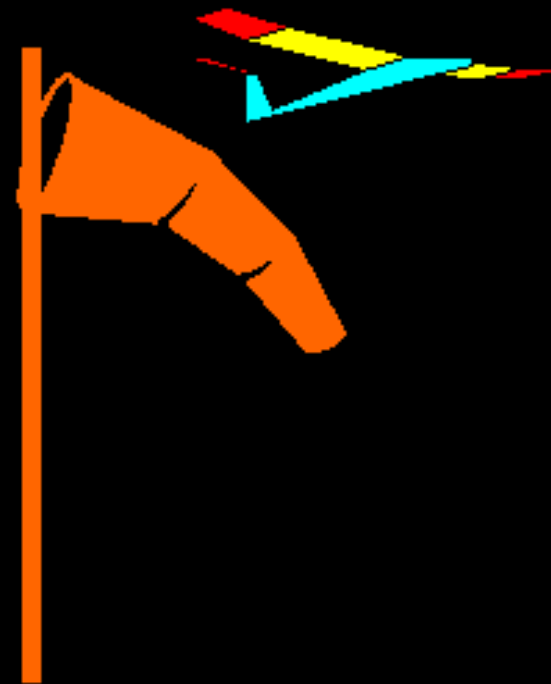
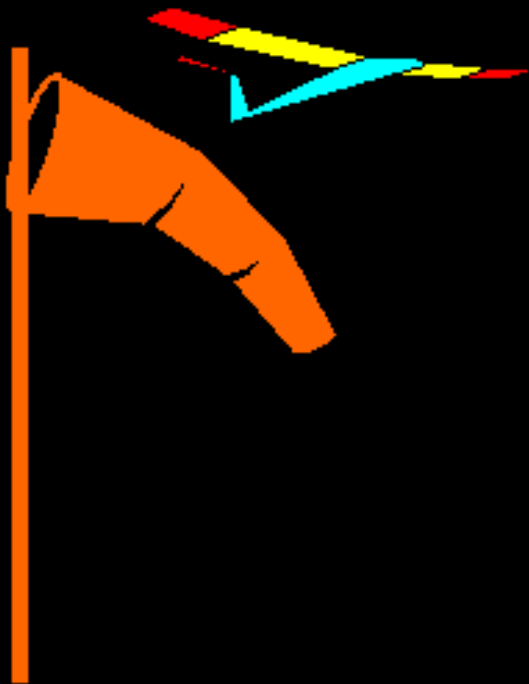


0.0  0.73 km



Force os olhos de modo a formar uma imagem entre as duas, e fixe o olhar nela. Use as mãos para tapar as imagens laterais. Depois de algum tempo verá em 3D.

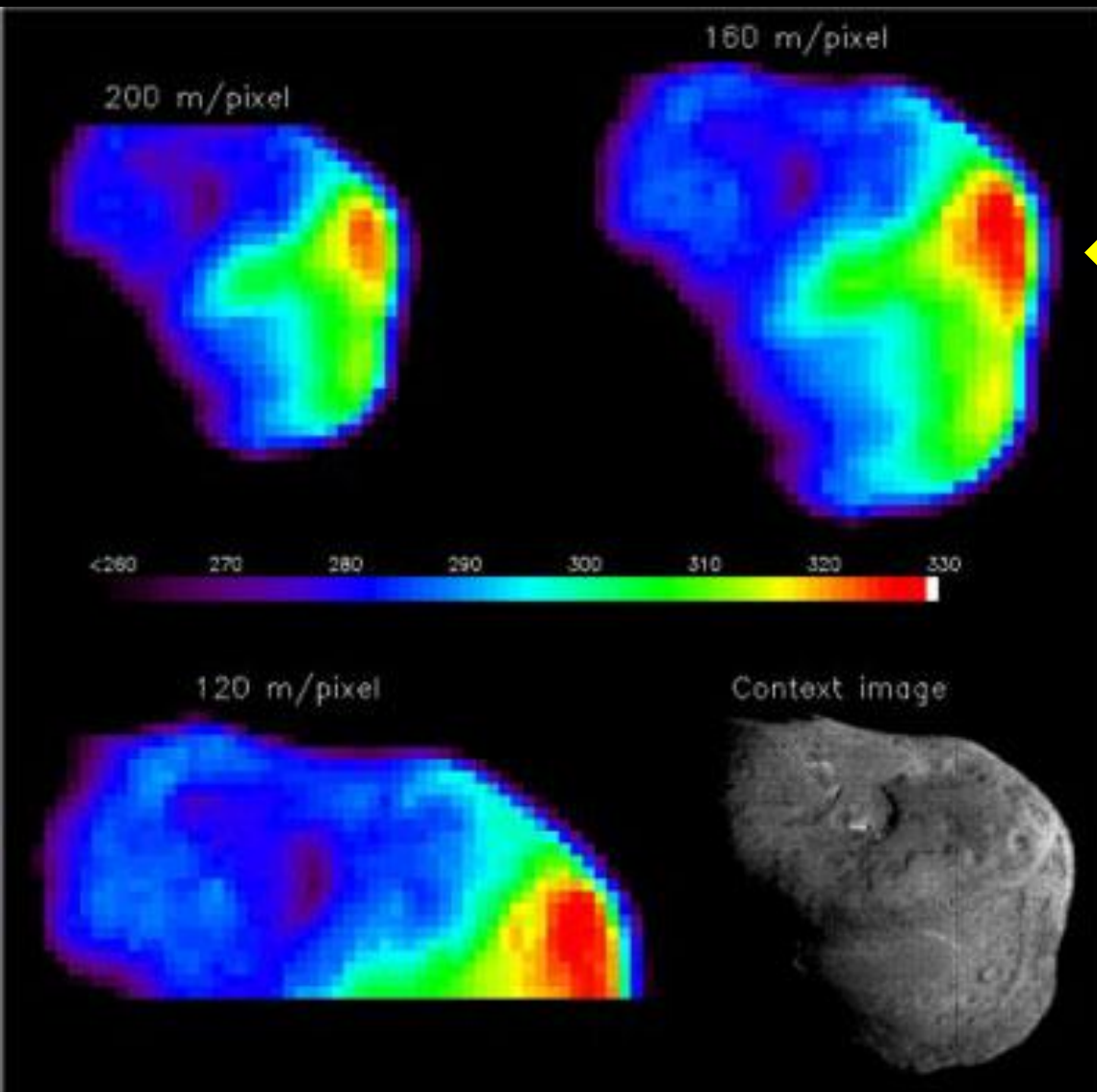
NASA/UM/Cornell/Peter Thomas



Force os olhos de modo a formar uma imagem entre as duas, e fixe o olhar nela. Use as mãos para tapar as imagens laterais. Depois de algum tempo verá em 3D.

NASA/UM/Cornell/Peter Thomas

9P/Tempel 1: perfil de temperatura

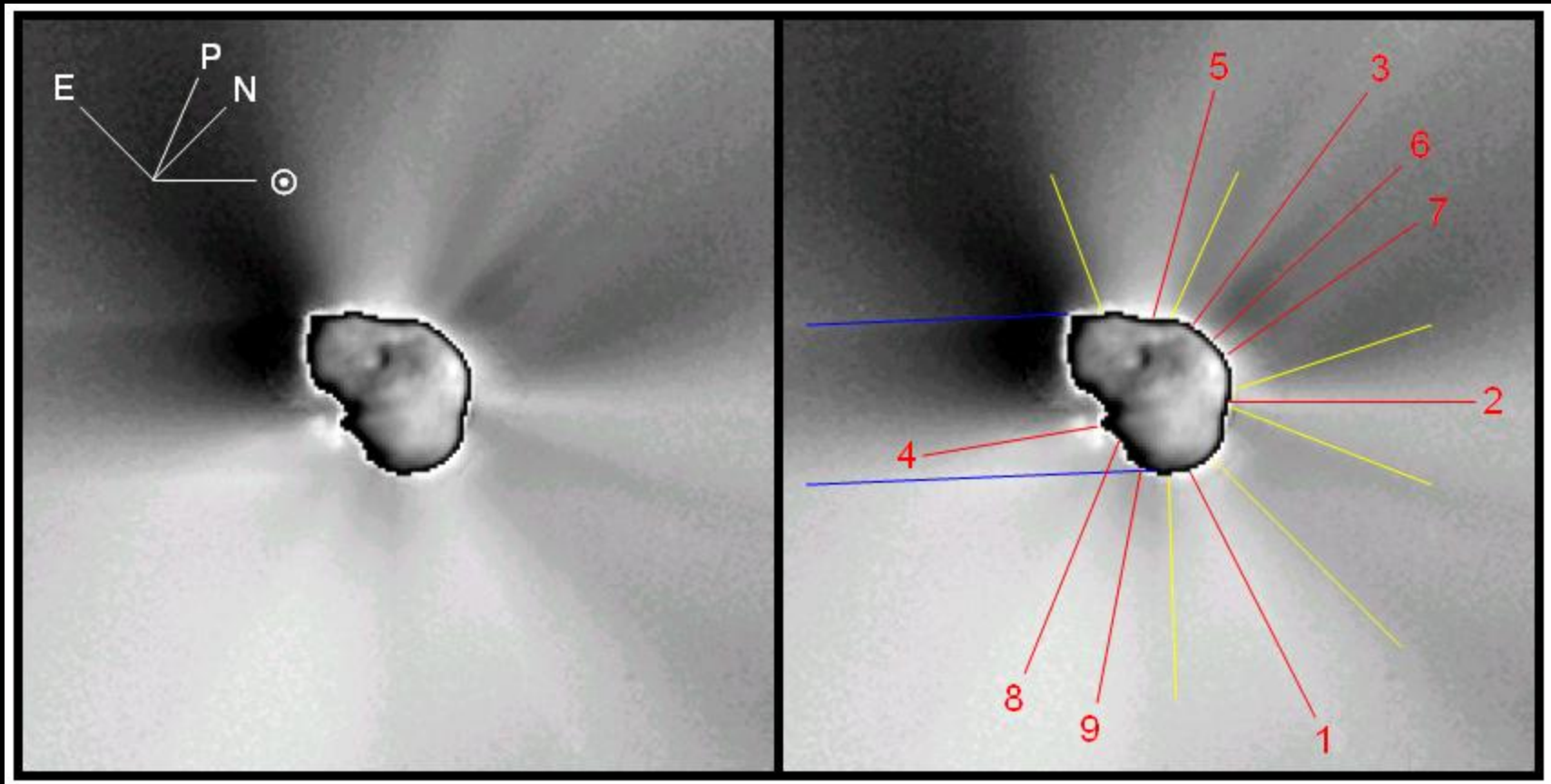


Luz solar

Gelo



9P/Tempel 1: imagem realçada da coma

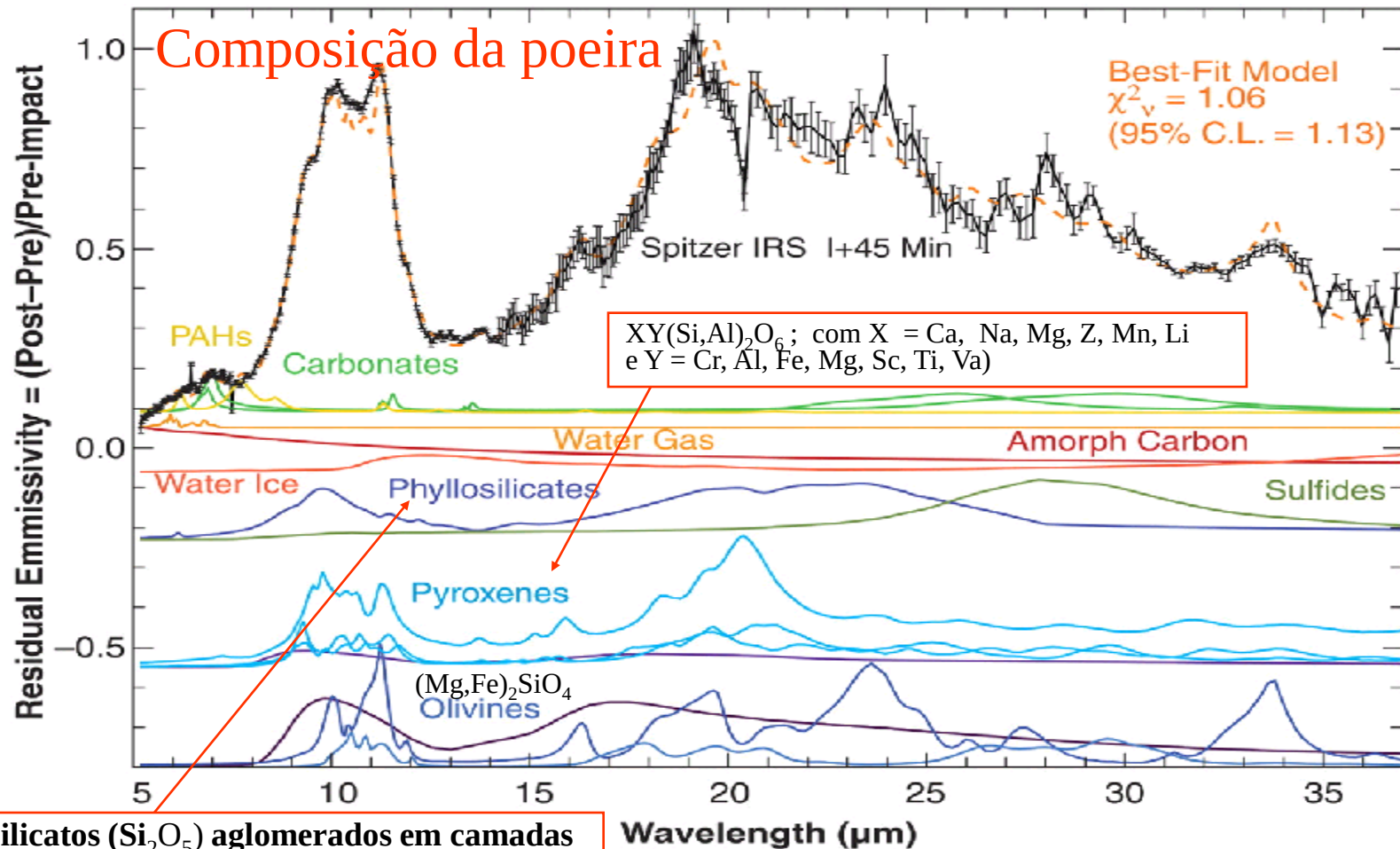


Linhas vermelhas indicam o centro dos jatos, e as linhas amarelas seus respectivos limites. Alguns jatos parecem provir de regiões que estão no lado de trás do núcleo.

Linhas azuis representam os limites das sombras.

NASA/UM/Tony Farnham

Spitzer 9P/Tempel 1 Ejecta Spectral Model



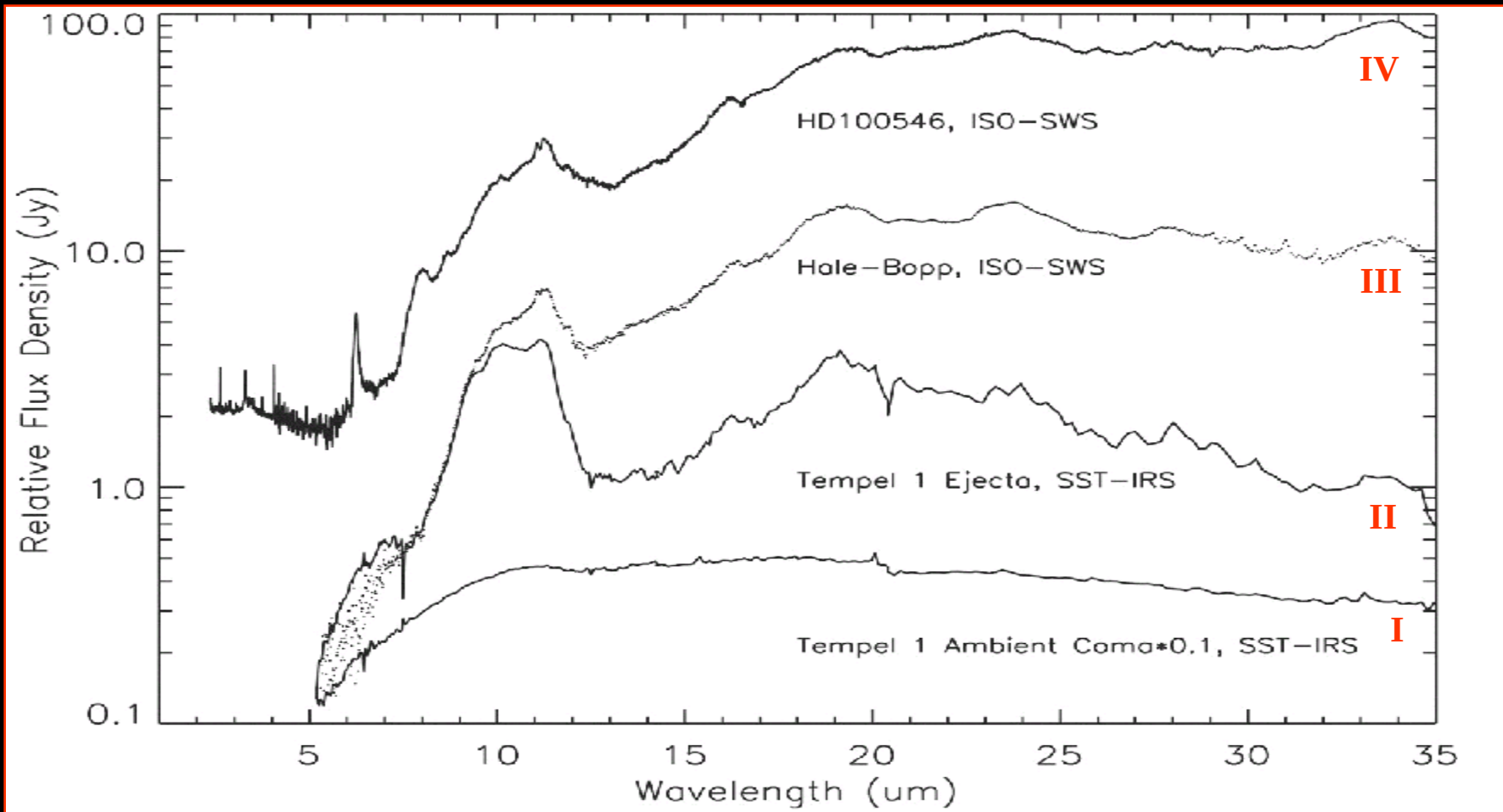
Silicatos (Si_2O_5) aglomerados em camadas paralelas

Técnica: subtrai o espectro pós-impacto do espectro pré-impacto, e divide pelo espectro pré-impacto
 Resultado: curva em preto.

Modelos de espectro baseados em compostos minerais e gelos são representados pelas curvas coloridas.
 Espectro final ajustado é mostrado em laranja pontilhado. Silicatos dominam a emissão observada.

NASA/UM C. M. Lisse et al., *Science* 313, 635 (2006); published online 13 July 2006
 (10.1126/science.1124694).

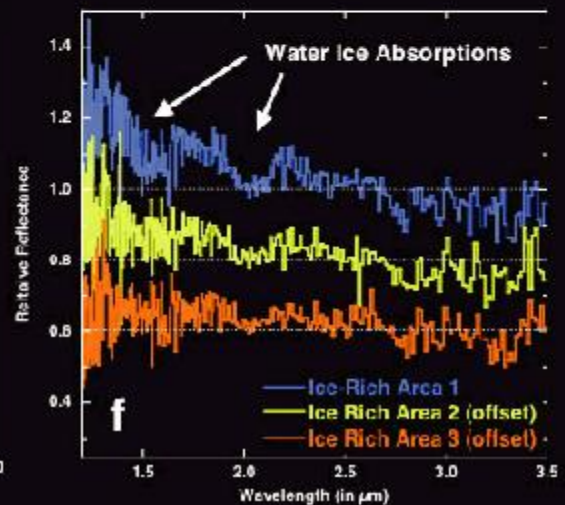
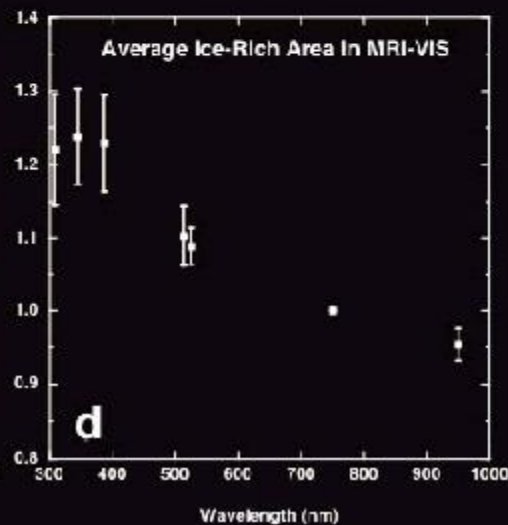
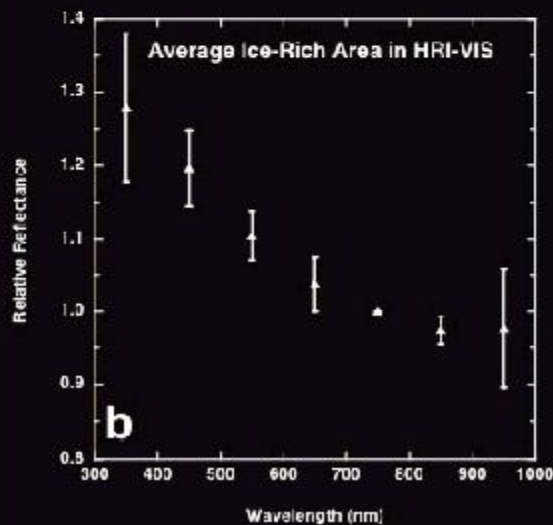
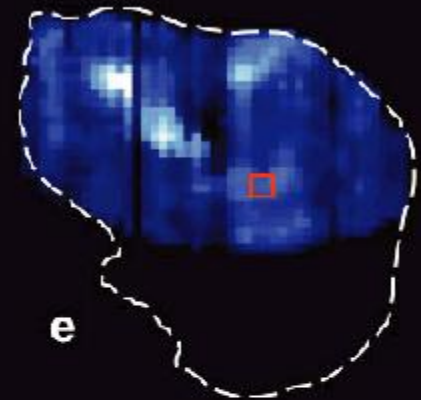
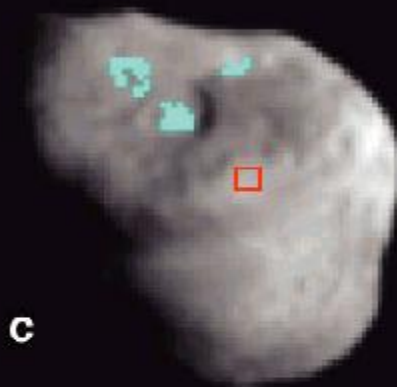
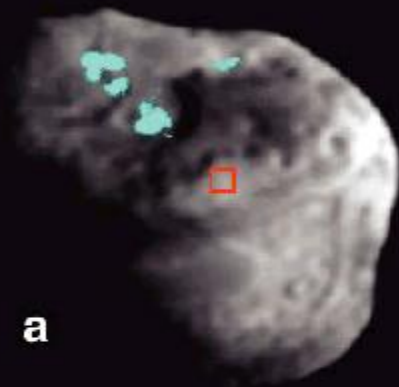
9P/Tempel 1: emissão térmica comparada



- I. espectro da coma (Spitzer Space Telescopes Infrared Spectrometer (IRS) 23 horas antes do impacto
- II. espectro do material ejetado pelo impacto, após 45 minutos do impacto
- III. espectro do cometa Hale-Bopp (Infrared Space Observatory - ISO)
- IV. espectro de objeto estelar jovem HD100546

Mapas e espectro de áreas ricas em gelo relativamente às áreas secas

Mapas e espectro de áreas ricas em gelo relativamente às áreas pobres em gelo

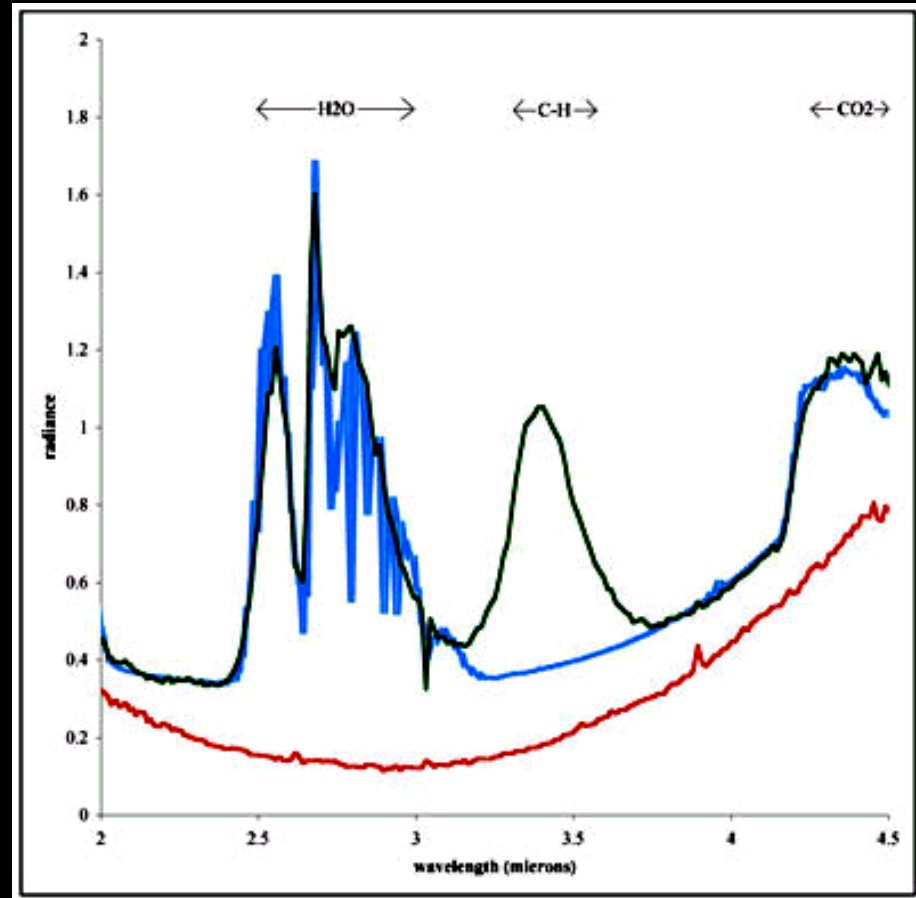


9P/Tempel 1: espectro infravermelho do vapor

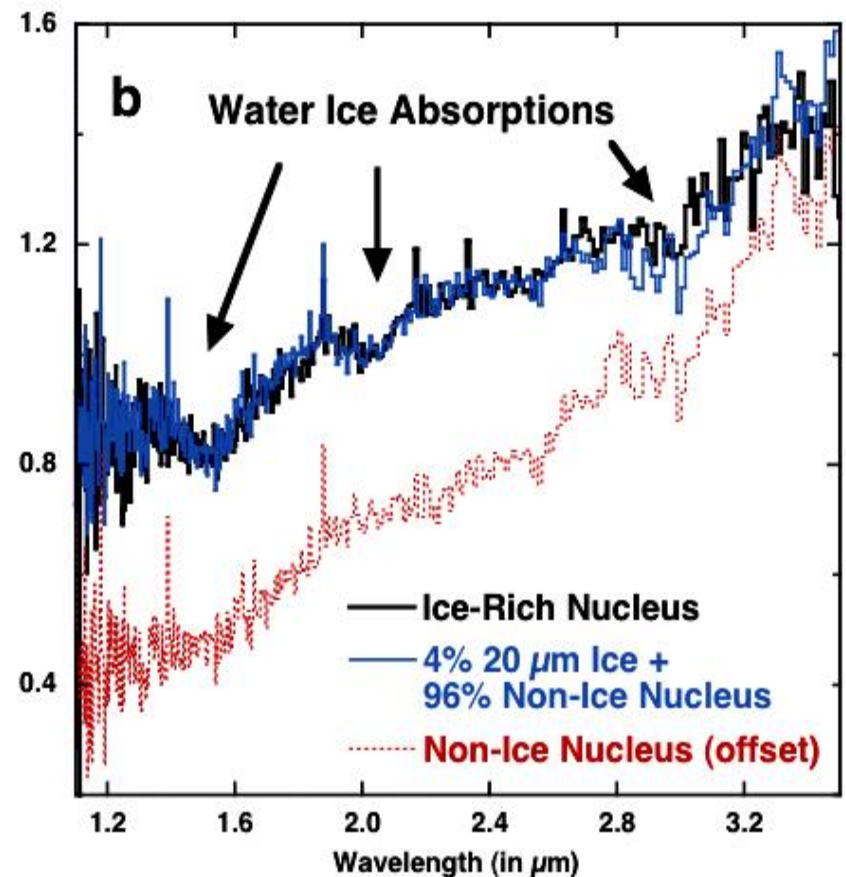
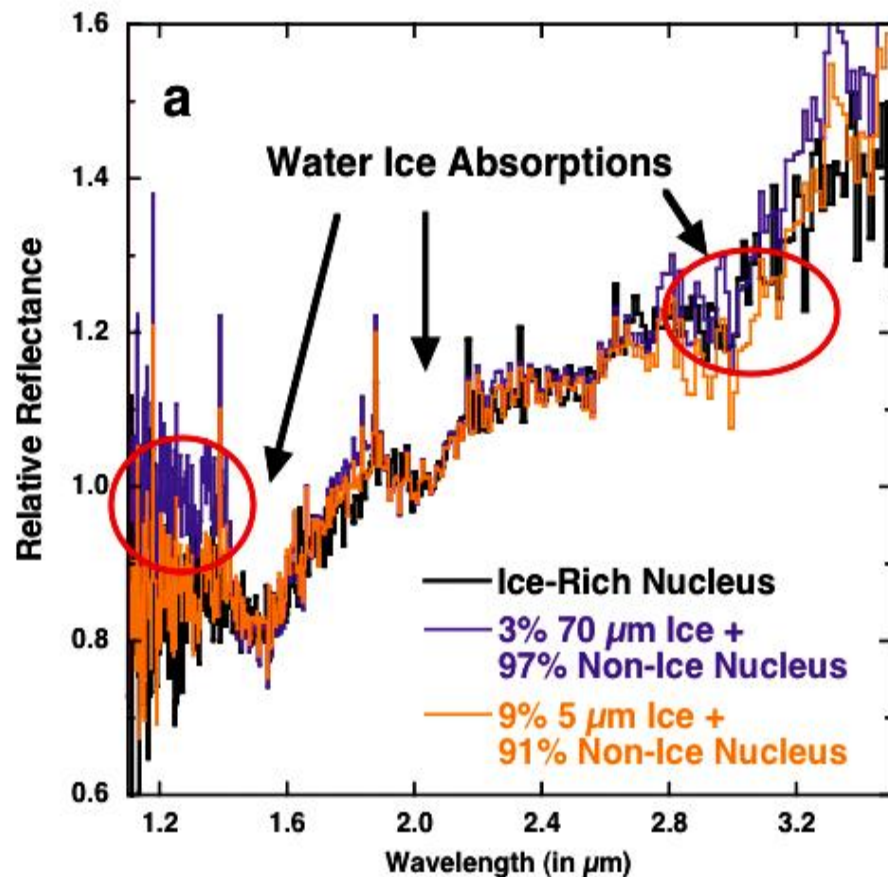
Verde: Pluma de vapor após 0,6s do impacto

Azul: modelo considerando água, dióxido de carbono a 1400K e emissão térmica a 850K, sem a presença de compostos orgânicos entre 3,3 e 3,6 μm .

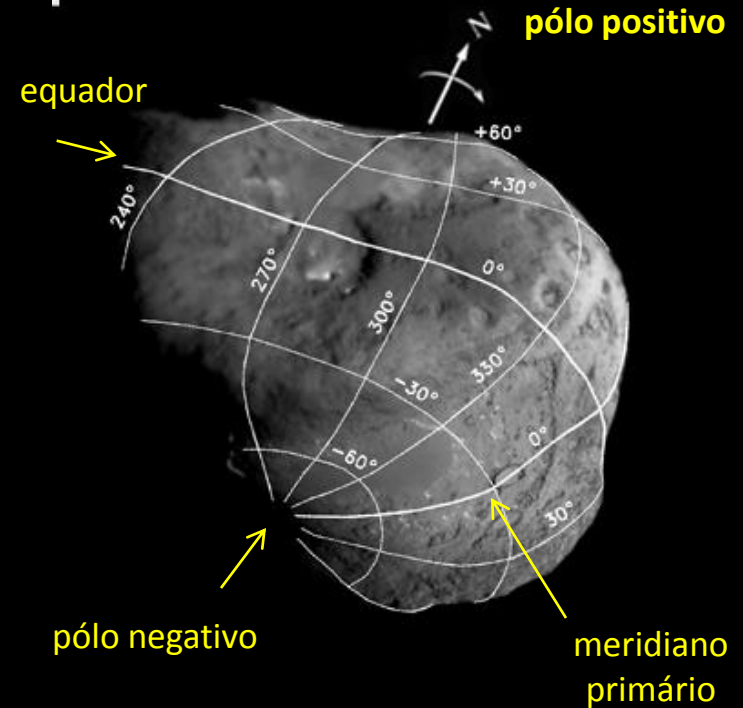
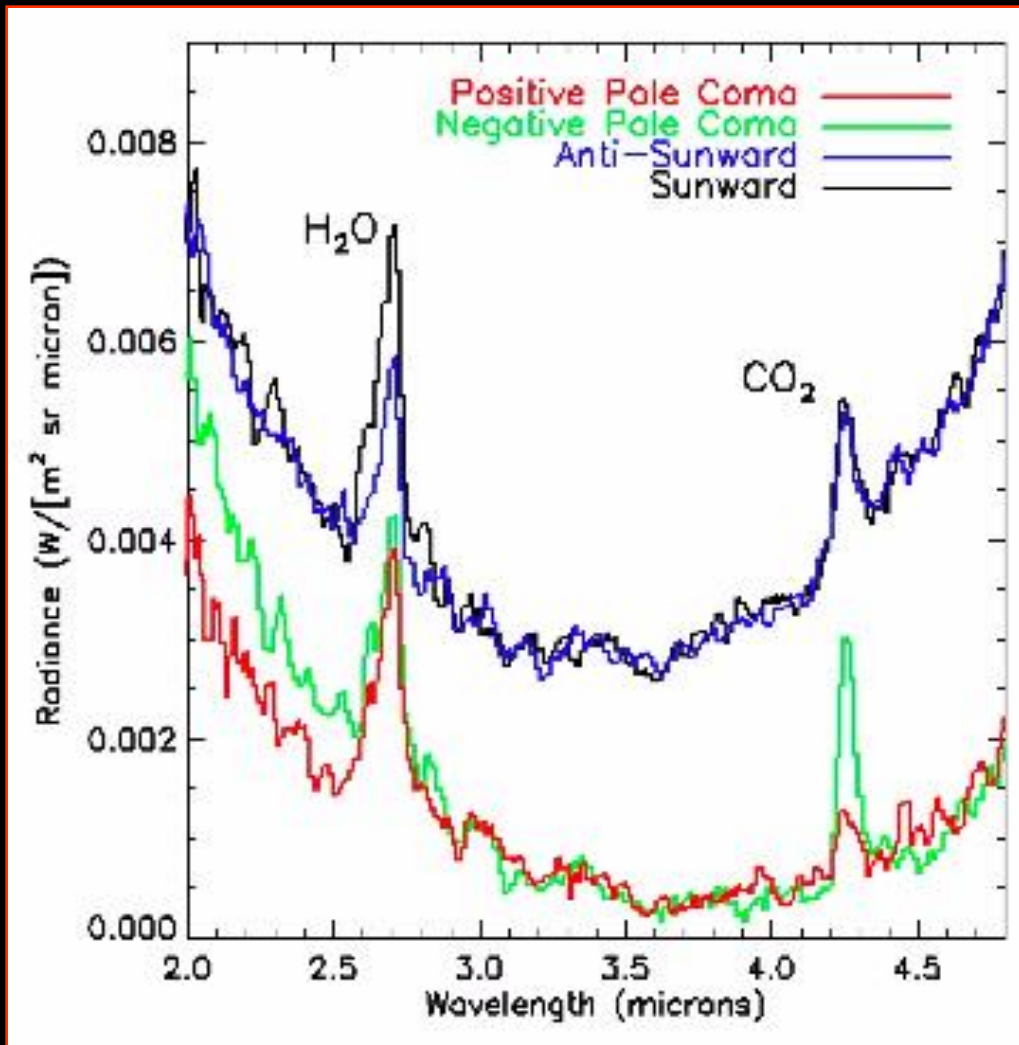
Vermelho: espectro apresentado 0,7 s antes do impacto



9P/Tempel 1: espectro de gelo superficial



9P/Tempel 1: espectro do H₂O e do CO₂



A longitude aumenta na direção da rotação da mão direita (convenção da IAU).

O meridiano primário é definido como sendo aquele que passa pela cratera acima da região de impacto.

Origem da água na Terra

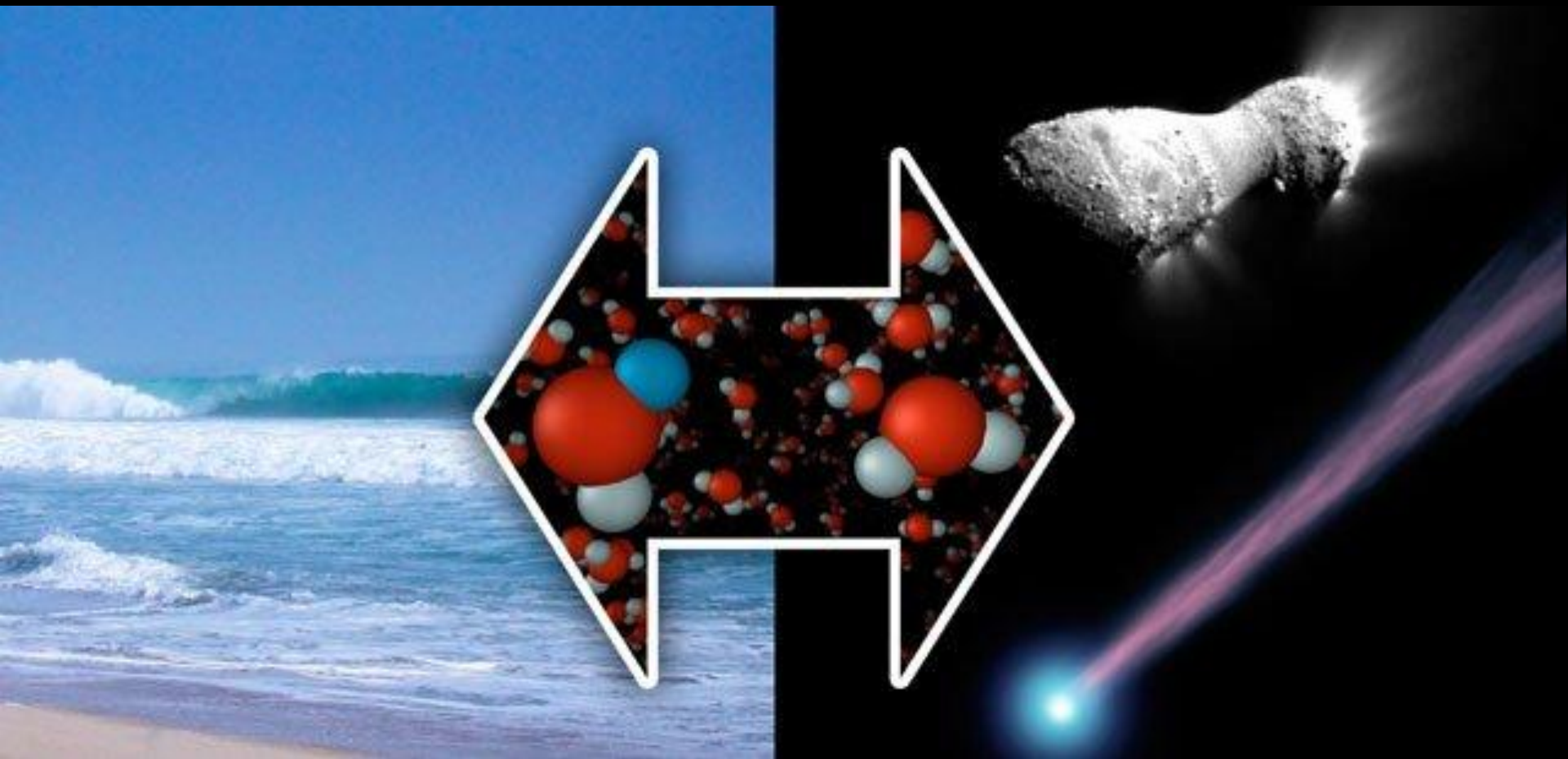


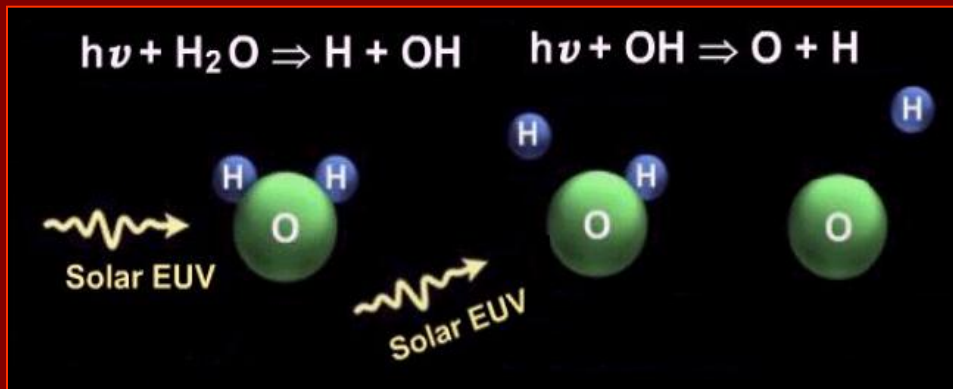
Image credit: NASA/JPL-Caltech

Água na Terra e perda

Local	Volume (km ³)	Percentual do total (%)
Oceanos	1.370.000	97,61
Calotas polares e geleiras	29.000	2,08
Água subterrânea	4.000	0,29
Água doce de lagos	125	0,009
Água salgada de lagos	104	0,008
Água misturada no solo	67	0,005
Rios	1,2	0,00009
Vapor d'água na atmosfera	14	0,0009
Biosfera	6	0,00004

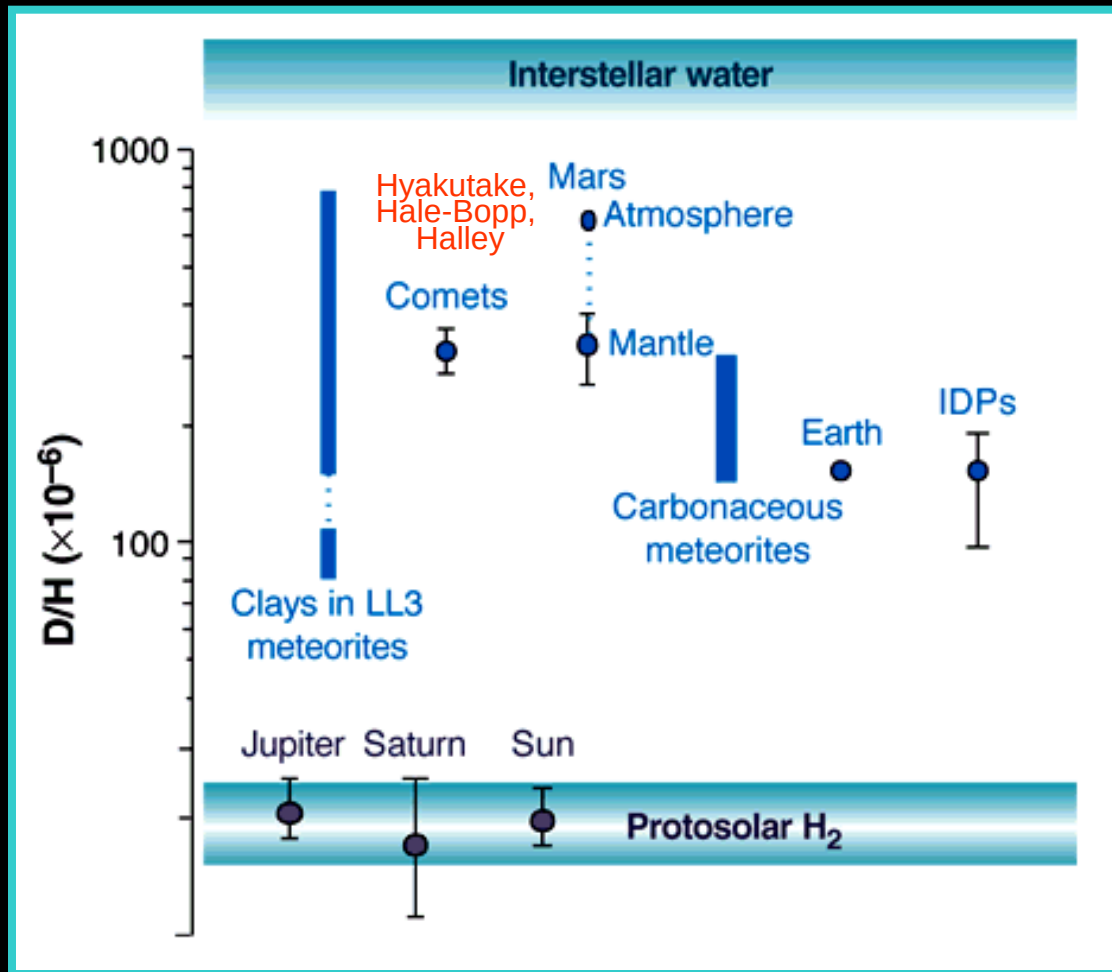
Fonte:
R.G. Wetzel,
1986

Fotodissociação da água:



- Estimativas apontam para uma perda de 5×10^5 ton / ano.
- Nos últimos 4 bilhões de anos a perda foi cerca de 2×10^{15} ton, ou 0,2 % do conteúdo atual dos oceanos.
- Vulcanismo ainda libera vapor de água.

Razão Deutério / Hidrogênio



A proximidade do Sol implica em aumento de temperatura e diminuição relativa do deutério.

Com o decréscimo da temperatura no gás, a mudança isotópica entre H_2 and H_2O implica em enriquecimento de D na água.

C. Lécluse, F. Robert, *Geochimica et Cosmochimica Acta*

Volume 58, Issue 13, July 1994, 2927-2939

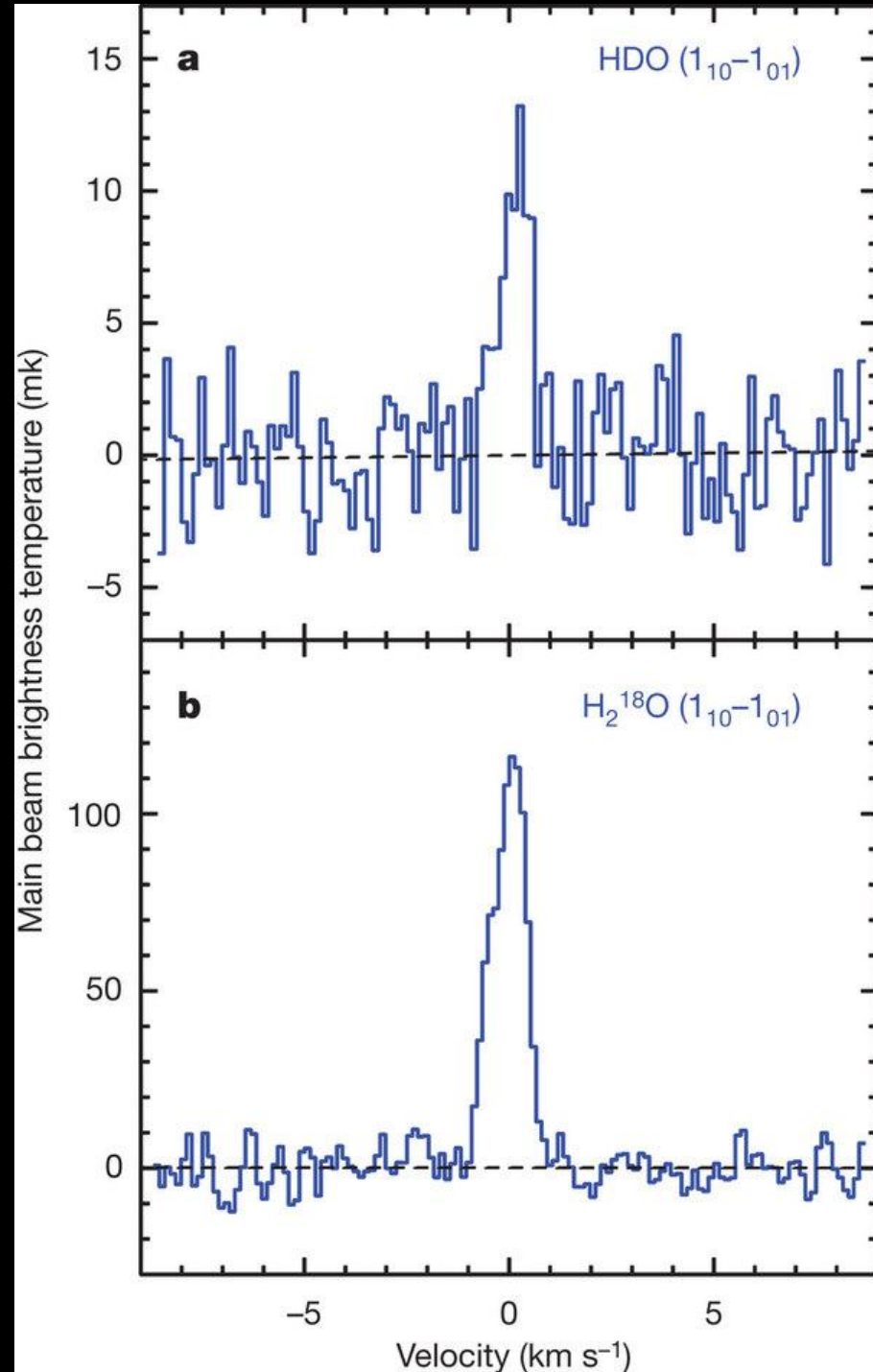
Inigma isotópico. Distribuição da composição isotópica do hidrogênio nos corpos do Sistema Solar.

François Robert, *Science* 10 August 2001, Vol. 293. no. 5532, pp. 1056 – 1058.

Razão Deutério / Hidrogênio

Água tipo oceânica no cometa 103P/Hartley 2 da família de Júpiter

- Paul Hartogh, et al. 2011, Nature (on line) Oct 05, doi:10.1038/nature10519



Razão Deutério / Hidrogênio

D. C. Lis, N. Biver, D. Bockelée-Morvan *et al.* (2013)

<http://arxiv.org/pdf/1307.6869.pdf>

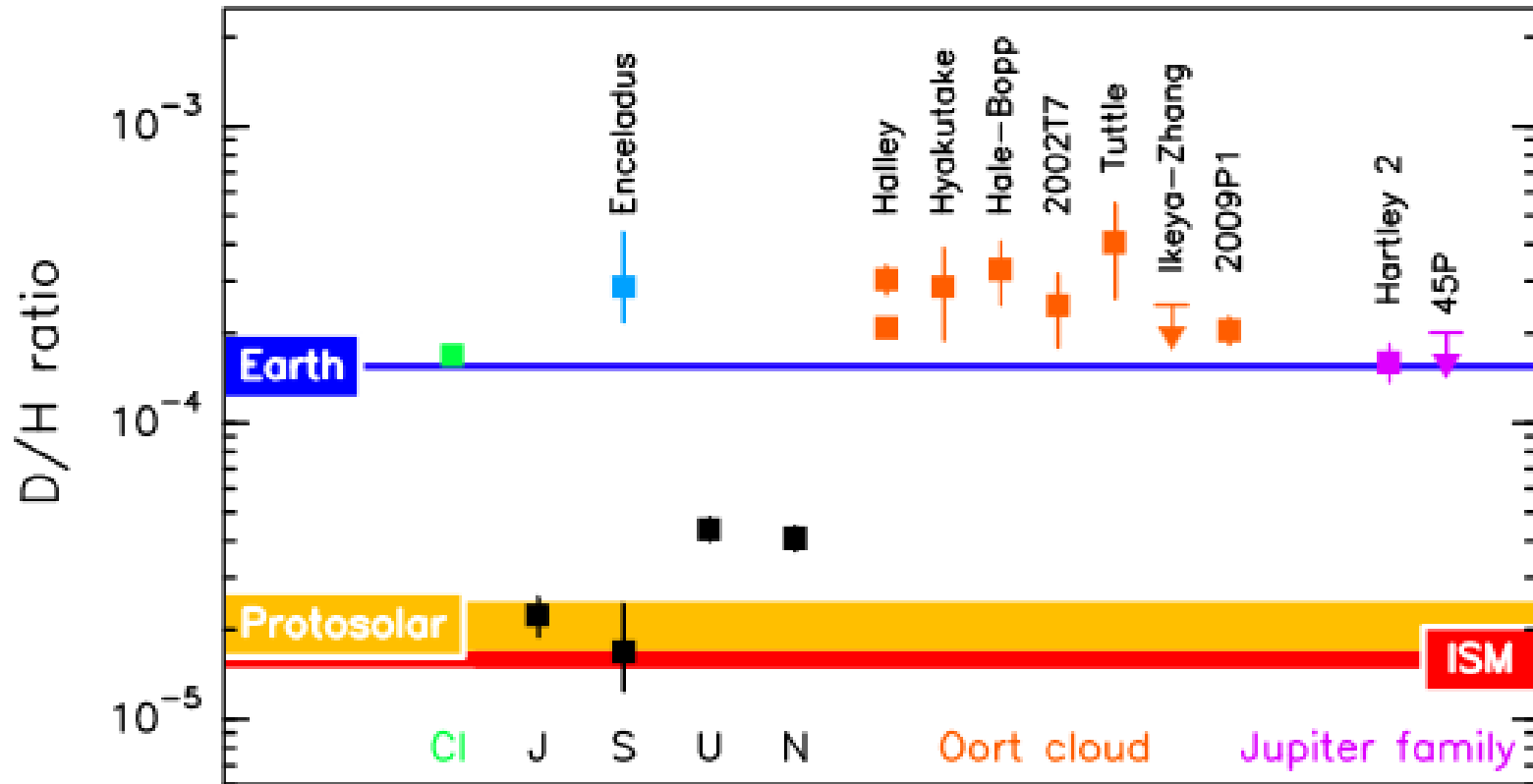


Fig. 4.— Updated version of the figure from Hartogh *et al.* (2011) and Bockelée-Morvan *et al.* (2012), which summarizes D/H values in solar system objects. Orange symbols are measurements in water in Oort-cloud comets and purple symbols in Jupiter-family comets (current 3σ upper limit for 45P). Black symbols are measurements in H_2 in atmospheres of giant planets—the Uranus and Neptune values have been revised to take into account the latest *Herschel* measurements (Feuchtgruber *et al.* 2013). Blue and green symbols are values in water in the plume of Saturn’s moon Enceladus and in CI carbonaceous chondrites, respectively. ISM and protosolar values are in H_2 and the Earth value is in water. Errorbars are 1σ .

Supplementary Table S1: D/H ratios in the solar system

•Paul Hartogh, et al. 2011, Nature (on line) Oct 05, doi:10.1038/nature10519

Object	Species	D/H $\times 10^{-4}$	Reference
Earth (VSMOW)	H ₂ O	1.558 ± 0.001	33
103P/Hartley 2	H ₂ O	1.61 ± 0.24	this work
1P/Halley	H ₂ O	3.06 ± 0.34	34
C/1996 B2 (Hyakutake)	H ₂ O	2.90 ± 1.00	35
C/1995 O1 (Hale-Bopp)	H ₂ O	3.3 ± 0.8	36
153P/Ikeya-Zhang	H ₂ O	< 2.50	37
C/2002 T7 (LINEAR)	H ₂ O	2.5 ± 0.7	38
8P/Tuttle	H ₂ O	4.09 ± 1.45	39
Enceladus	H ₂ O	$2.5^{+1.5}_{-0.7}$	40
CI chondrites	H ₂ O	1.70 ± 0.10	41
Protosolar	H ₂	0.21 ± 0.04	15
Interstellar medium	H	0.16 ± 0.01	15
Jupiter	H ₂	0.225 ± 0.035	42
Saturn	H ₂	$0.17^{+0.075}_{-0.045}$	42
Uranus	H ₂	$0.55^{+0.35}_{-0.15}$	43
Neptune	H ₂	0.45 ± 0.1	44

Compilation of the D/H ratios in the solar system following Figure 1: name of the object, species from which the D/H ratio was determined, D/H ratio with the corresponding uncertainty, reference to the measurement.

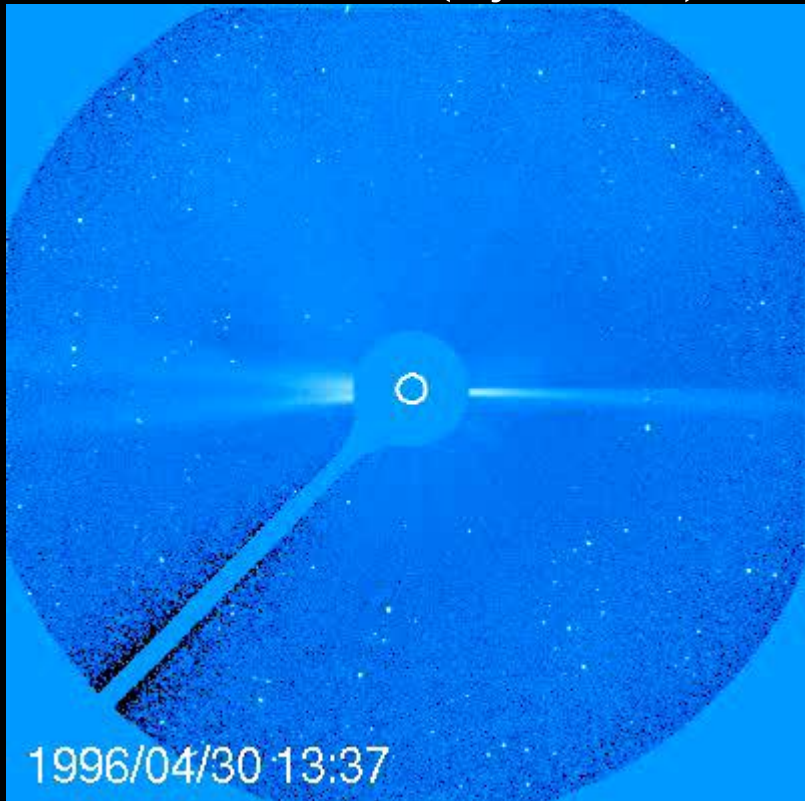
Certezas e Fatos

Fatos	Questões
Cometas guardam material primordial que formou o SS	O que existe abaixo das camadas superficiais (evoluídas)?
Cometa pode tornar-se dormente (hibernação)	O gelo foi exaurido? ou a sublimação é que foi inibida?
Deve haver muito cometas dormentes, confundidos com asteróides	Como distinguí-los?
Conhecemos melhor os detalhes químicos e físicos dos cometas que de outros corpos pequenos	Como usar esses detalhes para confinar nosso modelos para cometas?
A abundância de gases na coma é usada para deduzir características do gelo no disco protoplanetário	Qual a relação entre essas abundâncias da coma e aquelas do núcleo?
Os cometas se quebram quando submetidos a esforços pequenos	Qual a relação entre a variação da dureza do material e o tamanho?



Comet Hyakutake C/1996 B2 • HST WFPC2
H. Weaver (ARC), NASA

C/1996 B2 (Hyakutake)

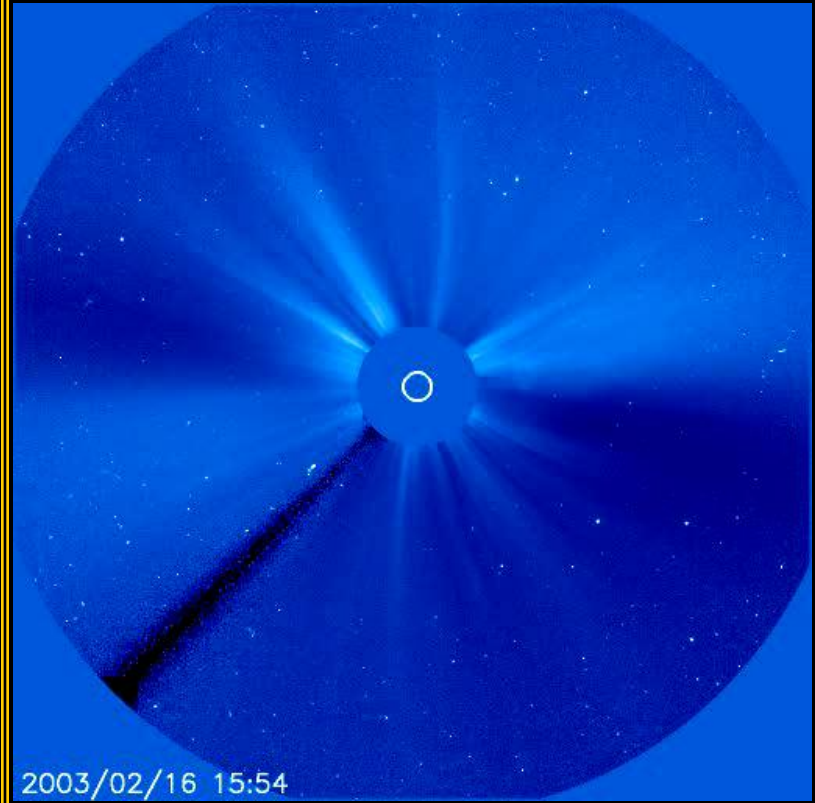


Cometas

C/1996 B2 (Hyakutake)

C/2002 V1 (NEAT)

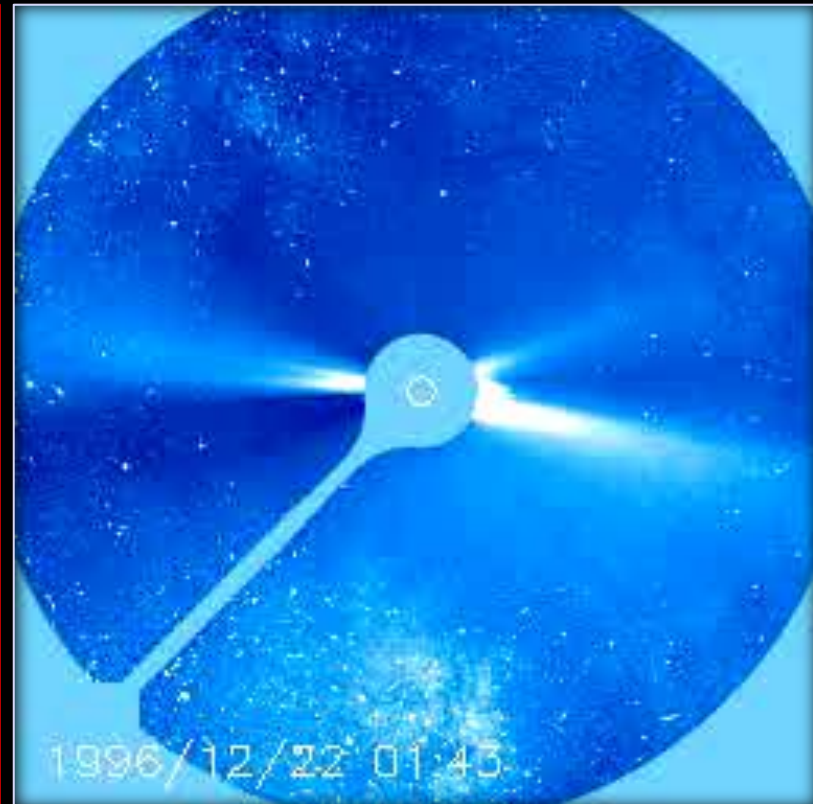
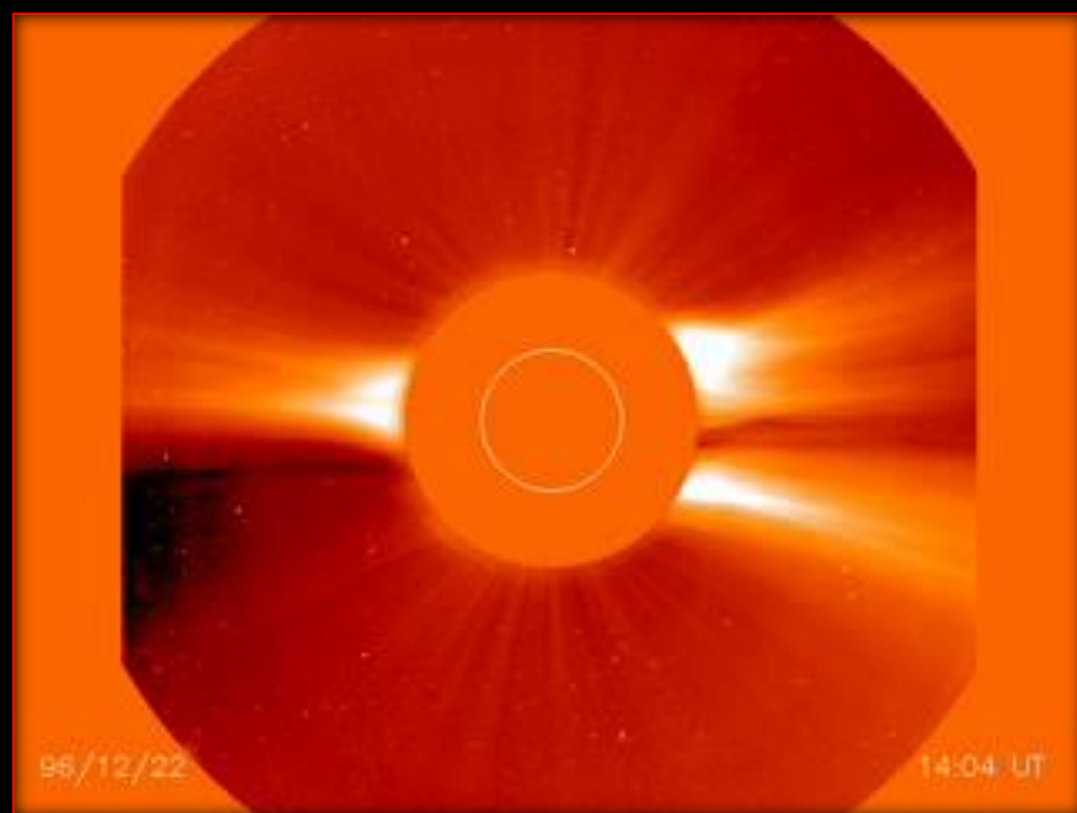
Cometa C/2002 V1 (NEAT)



Cometas rasantes

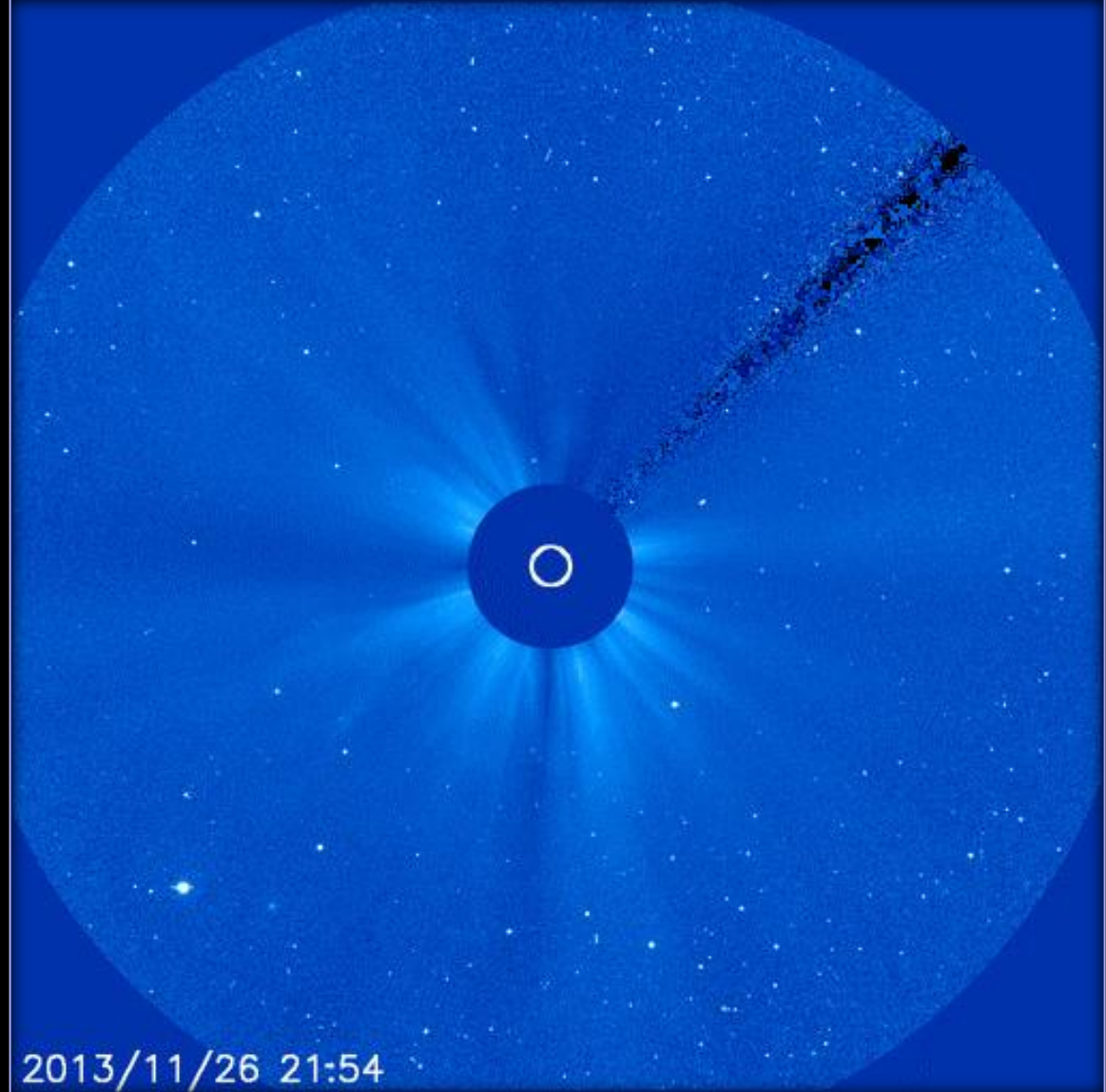
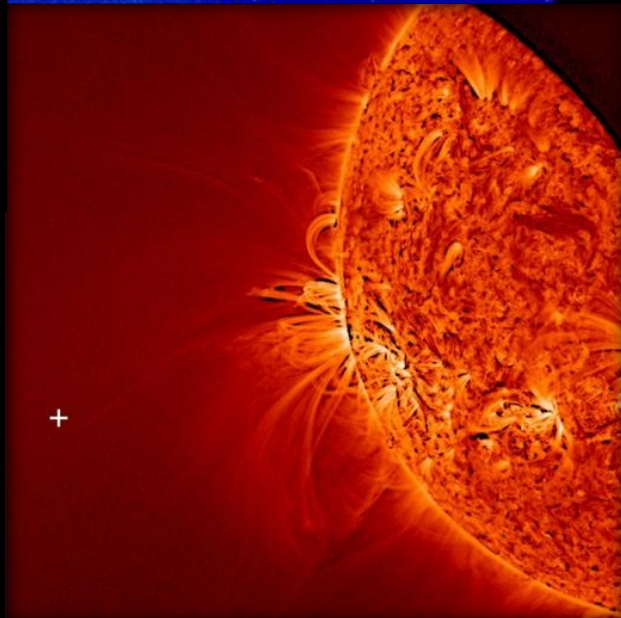
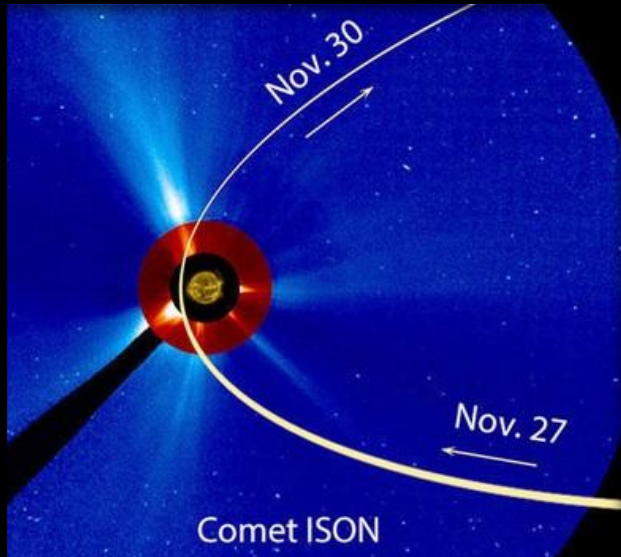
Possuem distâncias periélicas muito curtas; como passam muito perto do Sol são difíceis de serem vistos. Muitos caem no Sol ou são desintegrados.

Caso típico é este cometa que surge repentinamente no campo de visão em 22/12/96 e desaparece no Sol em 23/12.



Cometas rasantes

Outro caso: cometa ISON (C/2012 S1). Ele sobreviveu à passagem periélica apesar de ter cruzado a coroa solar a 1.165.000 km (1,7 $R_{\odot}$) acima da fotosfera.



Cometas rasantes

Cometas ISON (C/2012 S1) e Encke (2P/)



Fragmentação: cometa C/1975 V1 (West)

NEW MEXICO STATE UNIVERSITY OBSERVATORY



8 MAR 76

12 MAR 76

14 MAR 76

18 MAR 76

24 MAR 76

COMET WEST

New Mexico State University

C/1975 V1 (West)
C/1975 V1 (West)

Fragmentação: cometa 73P/Schwassmann-Wachmann 3

Desintegrou-se em 40 fragmentos, cada um se portando como um cometa.

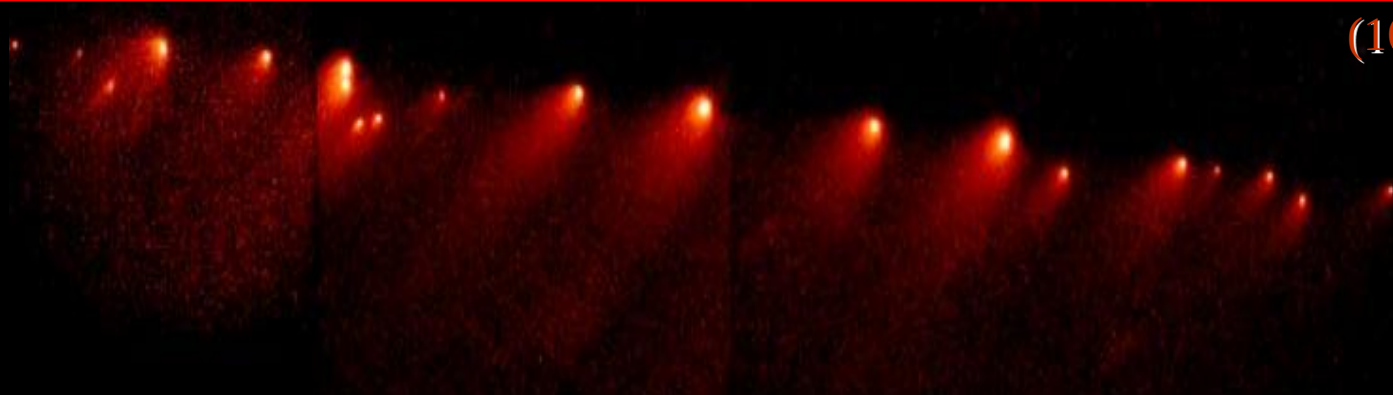
- Observação sugere que fragmentos são arrastados pelos jatos de gás produzidos pelo aquecimento solar.
- Fragmentos menores adquirem maior aceleração. Alguns deles desaparecem em questão de dias.
- Núcleo poroso e frágil pode não resistir às forças de maré provocadas por corpos maiores, à rotação rápida do núcleo, ao estresse térmico durante a passagem perielica, ou às eventuais reações químicas explosivas de seus voláteis.

Comet 73P/Schwassmann-Wachmann 3

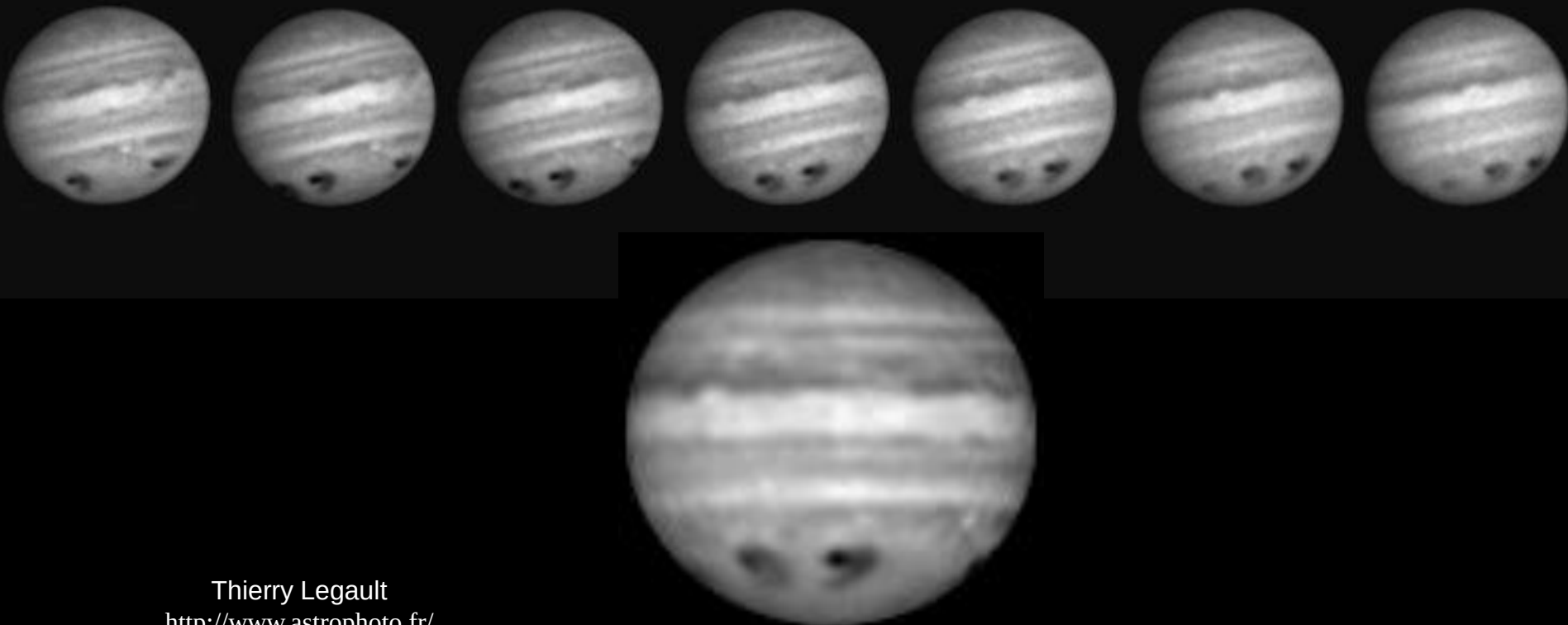


Fragmentação: cometa P/Shoemaker-Levy 9

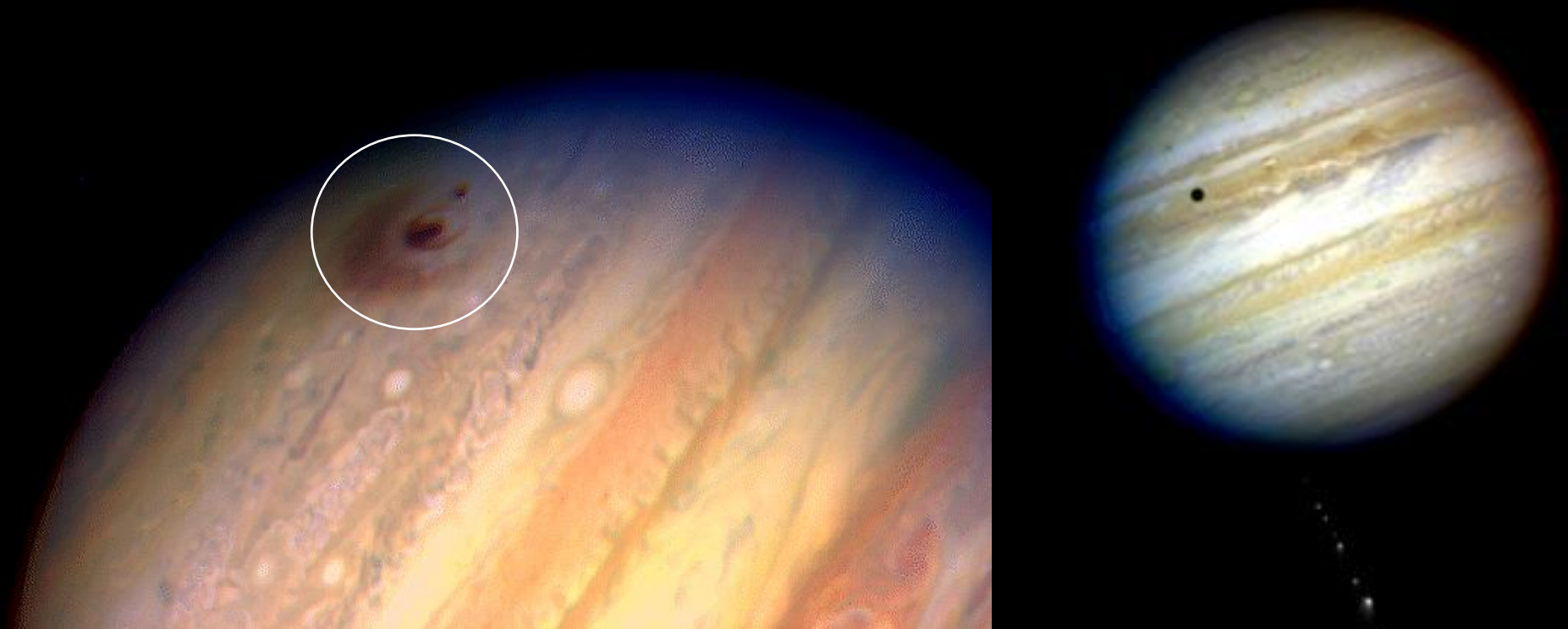
(16-22/7/1994)



Fragmentos do Cometa SL-9 aproximando-se de Júpiter. A fragmentação revela a fragilidade do núcleo cometário. (Telescópio espacial Hubble, NASA/STScI)



Fragmentação: cometa P/Shoemaker-Levy 9



Mancha decorrente desintegração do SL9 ao penetrar a espessa atmosfera de Júpiter. Nenhum evento terrestre se equipara em violência a este ocorrido em Júpiter.

Crédito: Telescópio Espacial Hubble (NASA)

Longevidade dos cometas

- Com exceção dos cometas de curto período, as órbitas dos cometas são altamente excêntricas, portanto os afélios estão muito distantes do Sol.
- Pela 2a. Lei de Kepler, as velocidades nos afélios são mínimas.

• **Conclusão:** os cometas passam a maior parte de suas vidas nas regiões frias (~ 50 K) do Sistema Solar.

- Isto lhes permitem vidas superiores a 100.000 anos.
- Planetas gigantes, principalmente Júpiter, alteram as órbitas dos cometas de longo período, transformando-os em cometas de curto período (que “morrem” mais cedo devido às sucessivas passagens pelo Sol).

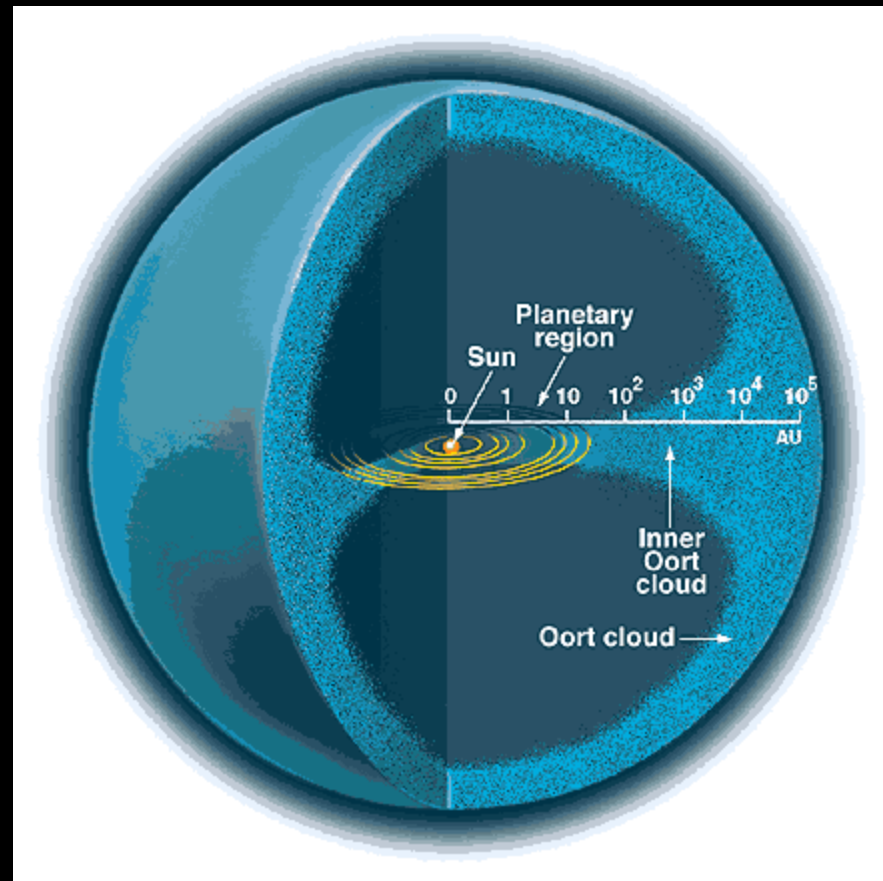
Gravitação e Forças de Maré podem diminuir a vida de um cometa: forças de maré, decorrentes da aproximação com corpos de grande massa, provocam a fragmentação do núcleo, e a morte prematura do cometa.

Qualquer teoria deve explicar:

- As **elevadas excentricidades** das órbitas cometárias; e próximo de 1, às vezes excedendo;
- As **inclinações aleatórias** das órbitas, relativamente ao plano da eclíptica; ao contrário da maioria dos demais objetos;
- Os **períodos orbitais muito longos**; a média dos semieixos maiores é 25.000 UA, implicando em períodos de 4 milhões de anos.

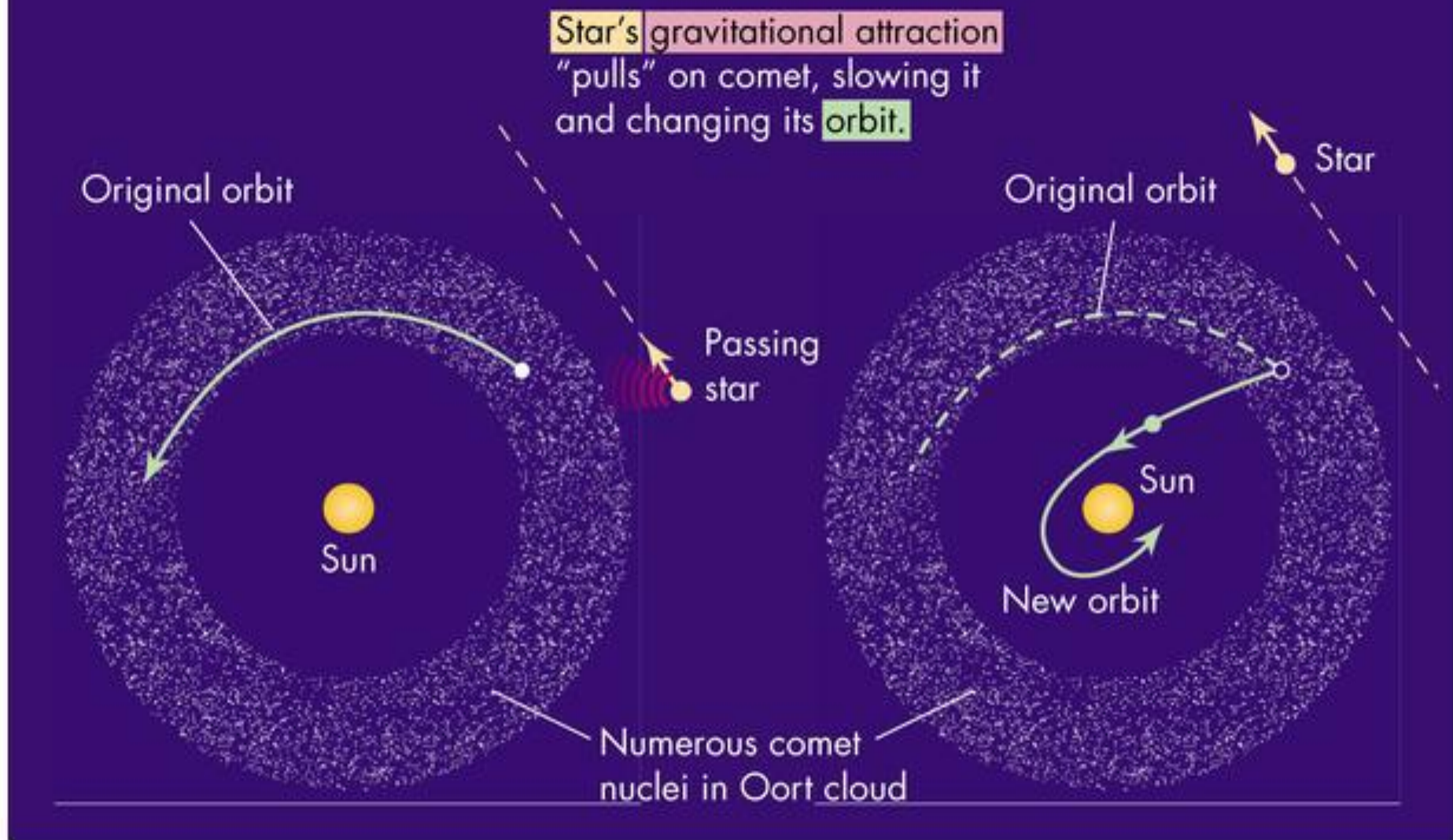
Origem dos cometas

- Ernst Öpik (Estoniano) propôs em 1932 que os cometas vinham de uma nuvem que circundava o Sistema Solar.
- Jan Oort (Holandês) tentou explicar uma contradição aparente: os cometas são destruídos após várias passagens pelas partes internas do SS.
 - Como explicar a existência deles após bilhões de anos de vida do SS?
 - Resposta: uma nuvem cometária nos confins do SS, com massa total várias vezes maior que a terrestre.



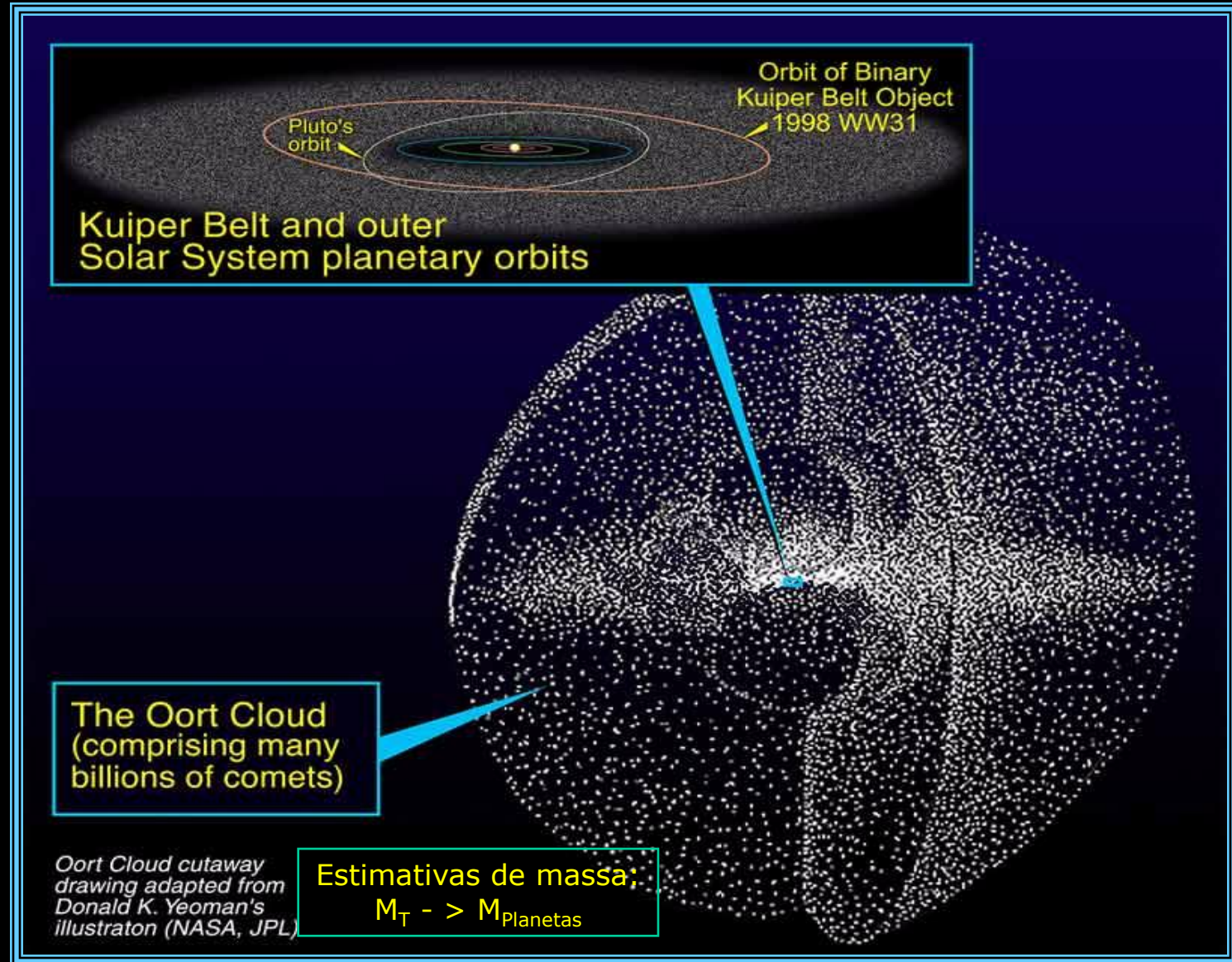
Essa nuvem esférica, com raio médio de 50.000 UA, circunda o Sol.
Ficou conhecida como **Nuvem de Oort**.



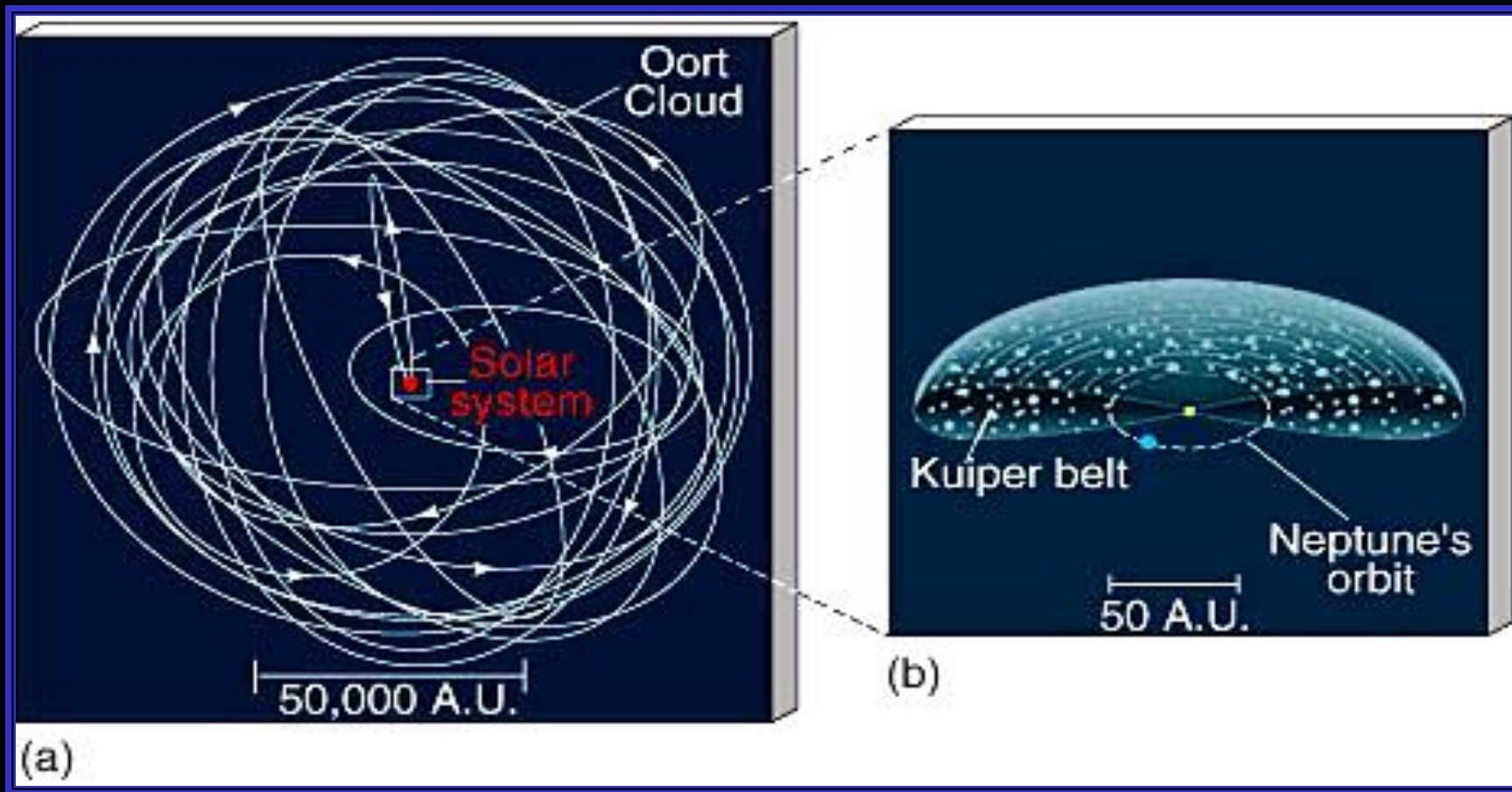


Os cometas giram ao redor do Sol dentro da Nuvem de Oort, por isso jamais penetram a parte interna do Sistema Solar. O movimento das estrelas na Galáxia pode provocar aproximações que perturbam as órbitas desses cometas, injetando uma parcela deles rumo ao Sol.

Cometas, Objetos do Cinturão Edgeworth-Kuiper e Nuvem Oort



Cometas, Objetos do Cinturão Edgeworth-Kuiper e Nuvem Oort

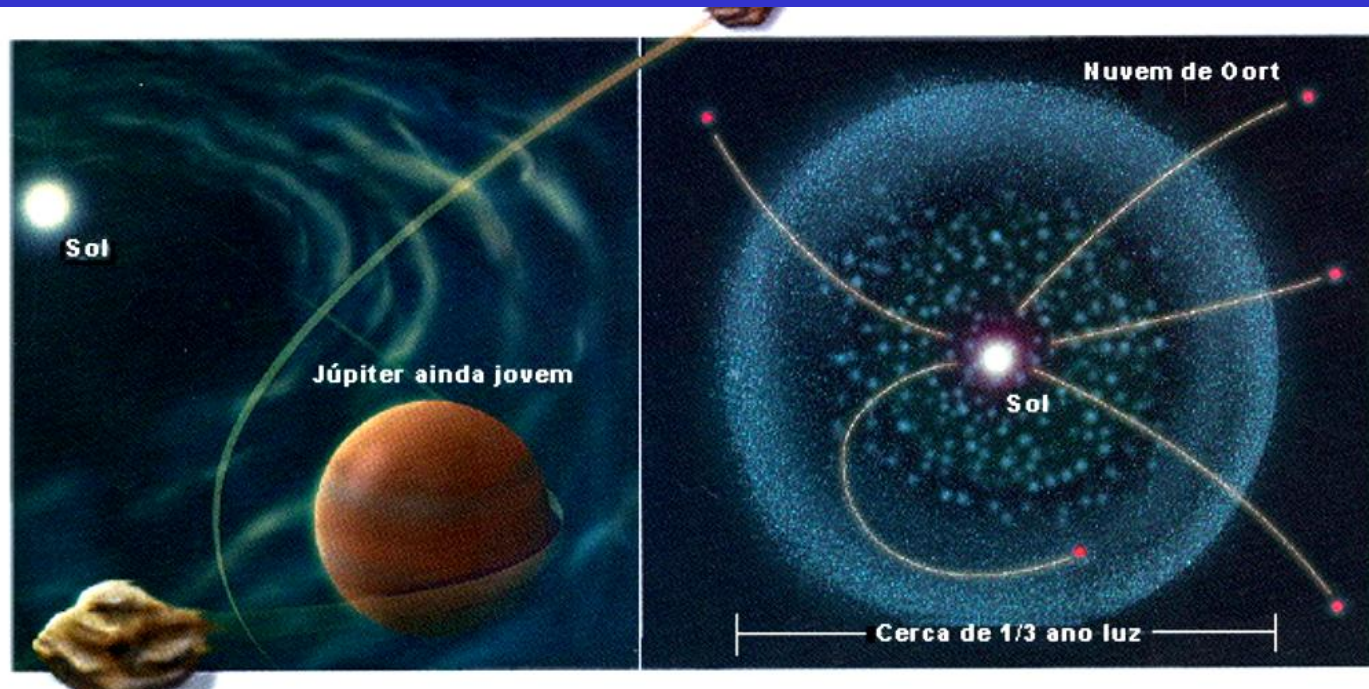


Cometas que se formaram na região dos planetas gigantes, e foram ejetados em decorrência de interação gravitacional. Fonte dos cometas de longo período, com órbitas diversas.

Cometas são objetos primitivos (planetóides), formados nessa região. Fonte dos cometas de períodos intermediários, com órbitas concentradas no plano da eclíptica.

Cometas, Objetos do Cinturão Edgeworth-Kuiper e Nuvem Oort

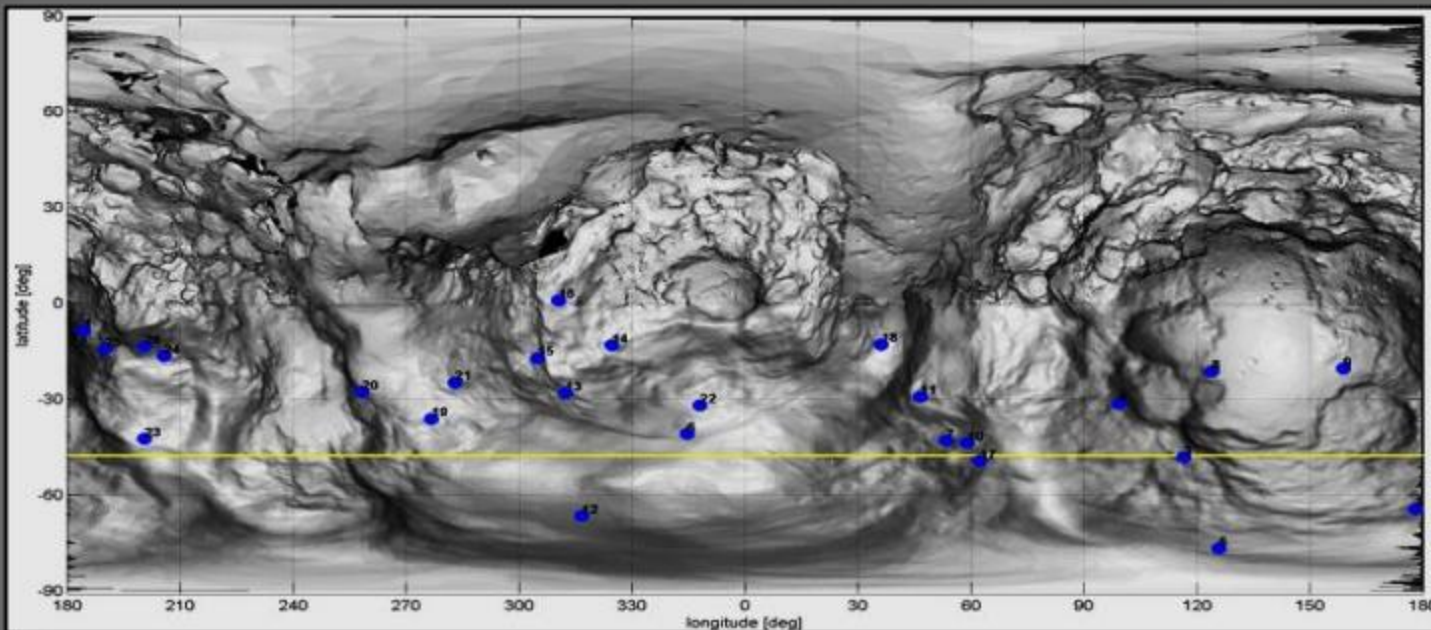
Mecanismo possível de formação da Nuvem de Oort: cometas que não formaram planetas foram ejetados (efeito gravitacional) com velocidade menor que a velocidade de escape do Sistema Solar



Cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko

- **Pontos azuis:** possíveis locais das fontes de jatos de gás e poeira.
- **Linha amarela** região onde os raios solares incidem verticalmente na superfície.

Fonte: ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team
MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA, 13/08/2015, 4:30 pm.



Cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko

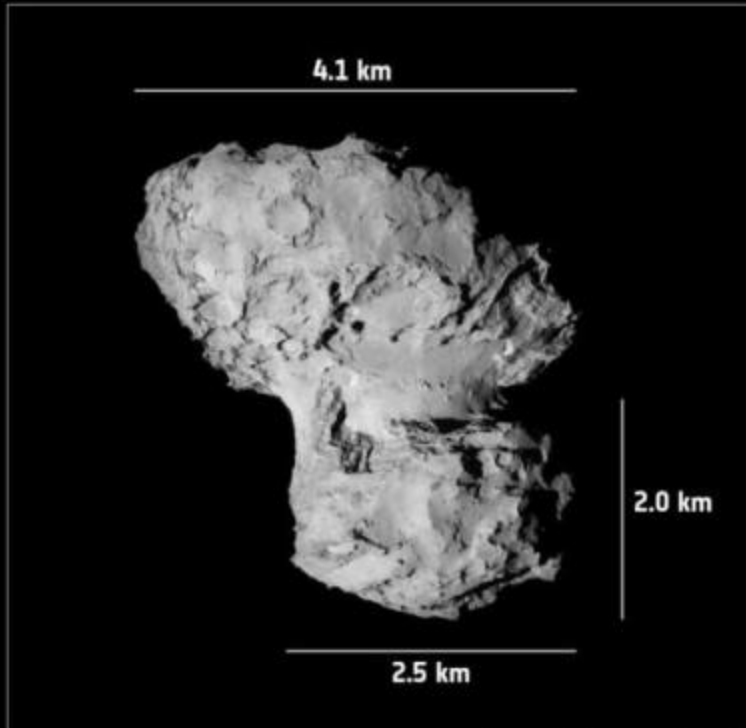
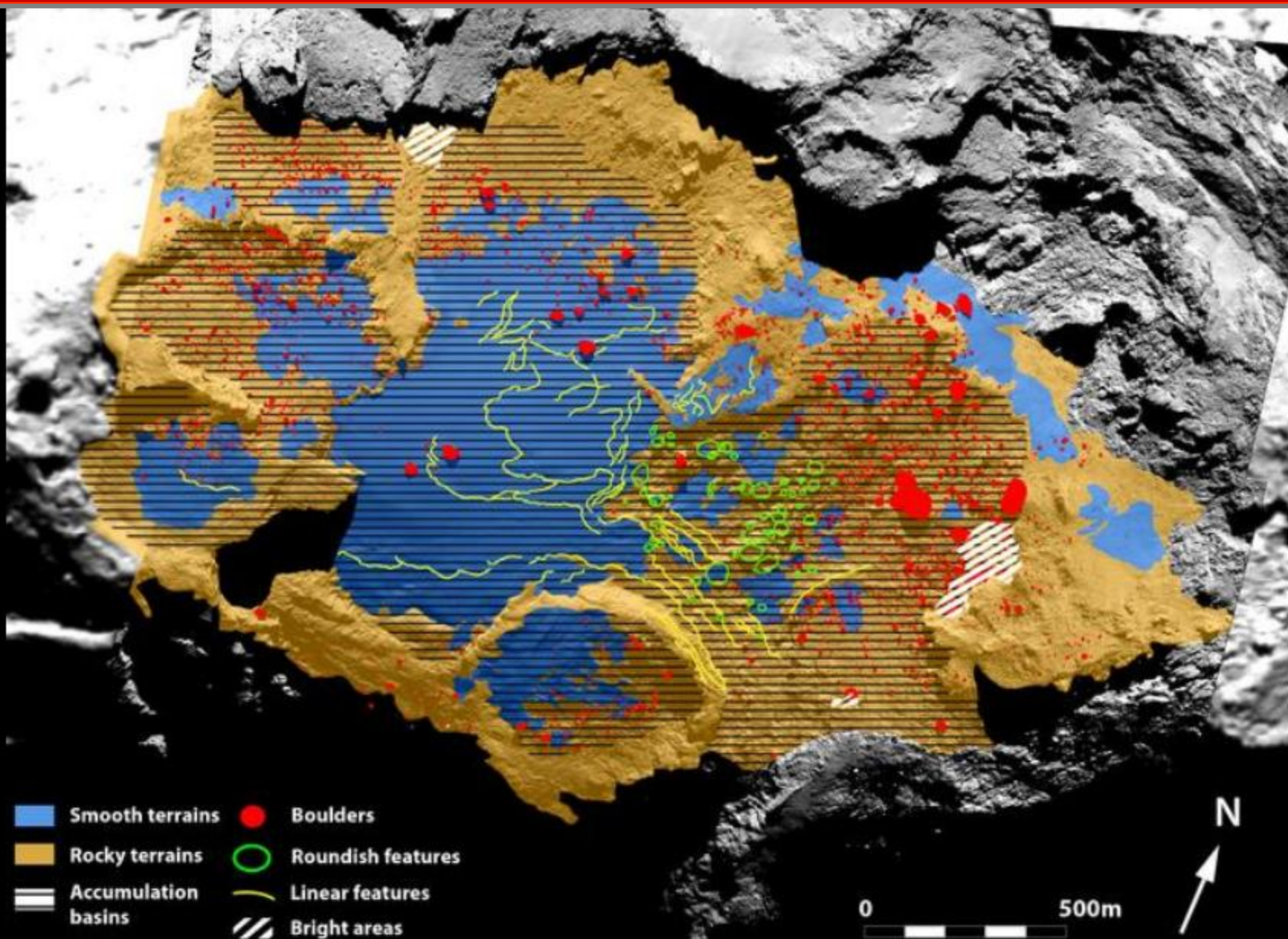


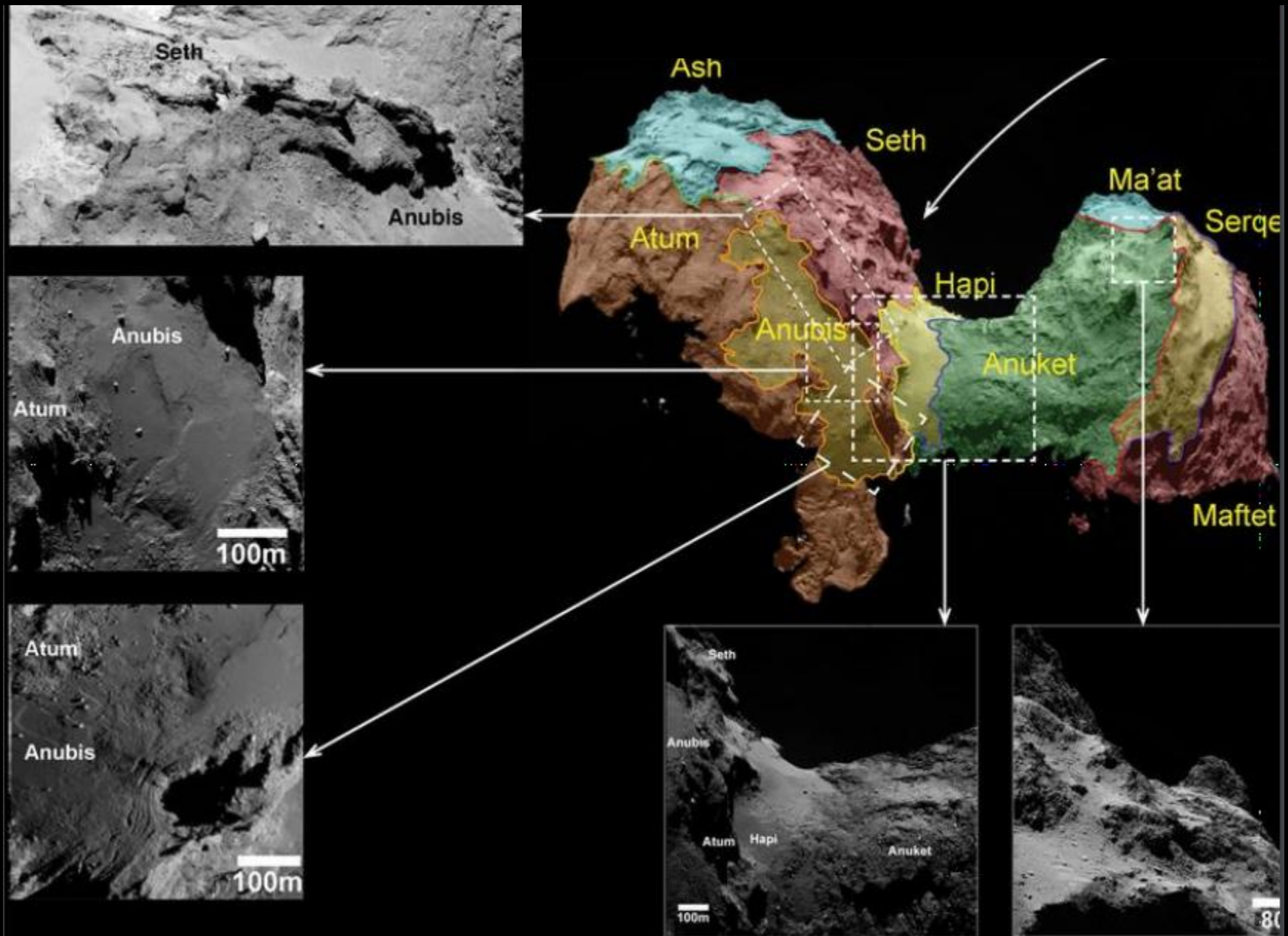
Image: ESA/Rosetta/NAVCAM; Dimensions: ESA/Rosetta/MP5 for OSIRIS Team MP5/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA

Dimensão (menor)	2.5 x 2.5 x 2.0 km	Densidade	0.4 g/cm ³
Dimensão (maior)	4.1 x 3.2 x 1.3 km	Produção de vapor de água	300 ml/seg (Jun 2014); 1–5 l/seg (Jul-Ago 2014)
Rotação	12.4043 horas	Temperatura da superfície	205–230K (Jul-Ago 2014)
Eixo de rotação	Ascensão reta: 69 graus; Declinação: 64 graus	Temperatura abaixo da superfície	30–160K (Ago 2014)
Massa	10 ¹³ kg	Gases identificados	Água, monóxido e dióxido de carbono, amônia, metano, metanol
Volume	25 km ³	Grãos (rochosos)	Entre dezenas e centenas de microns

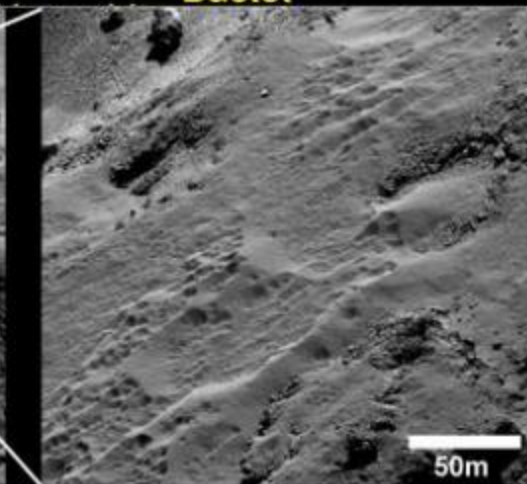
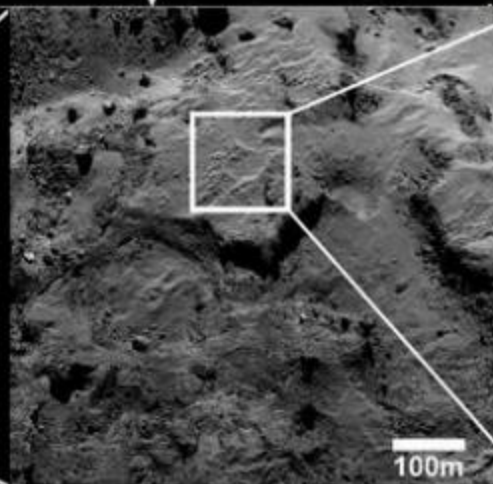
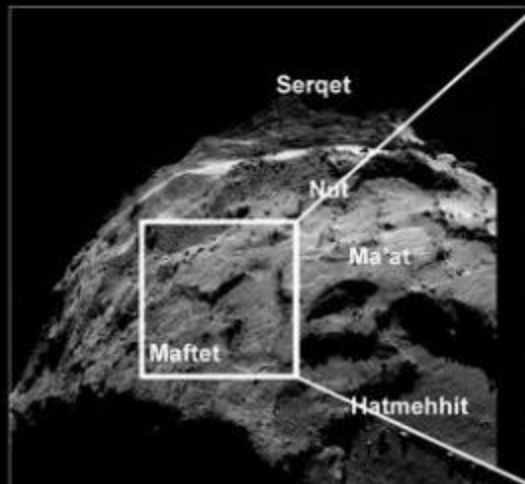
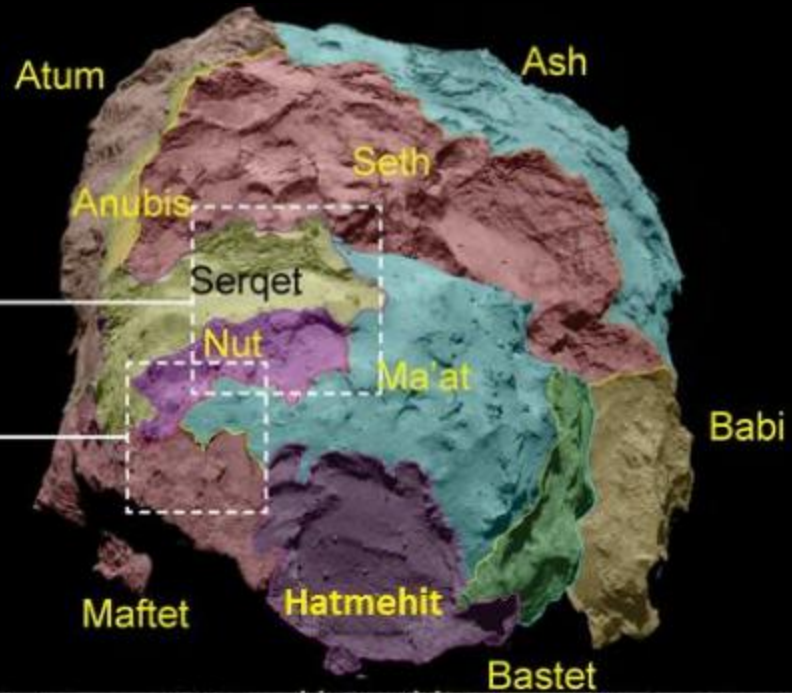
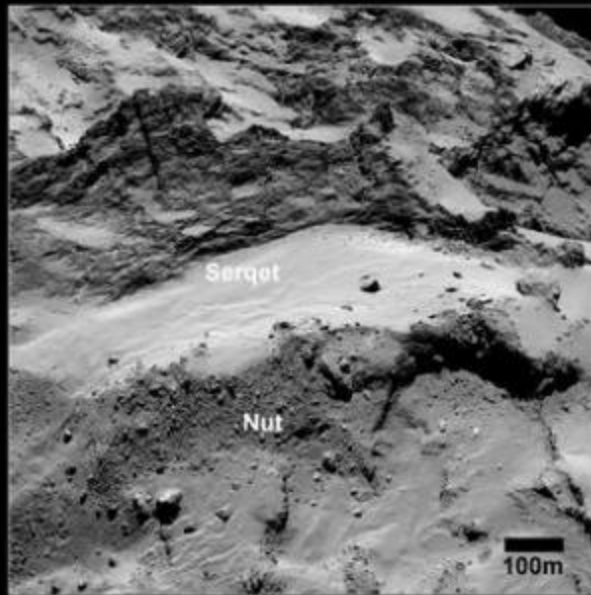
Cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko



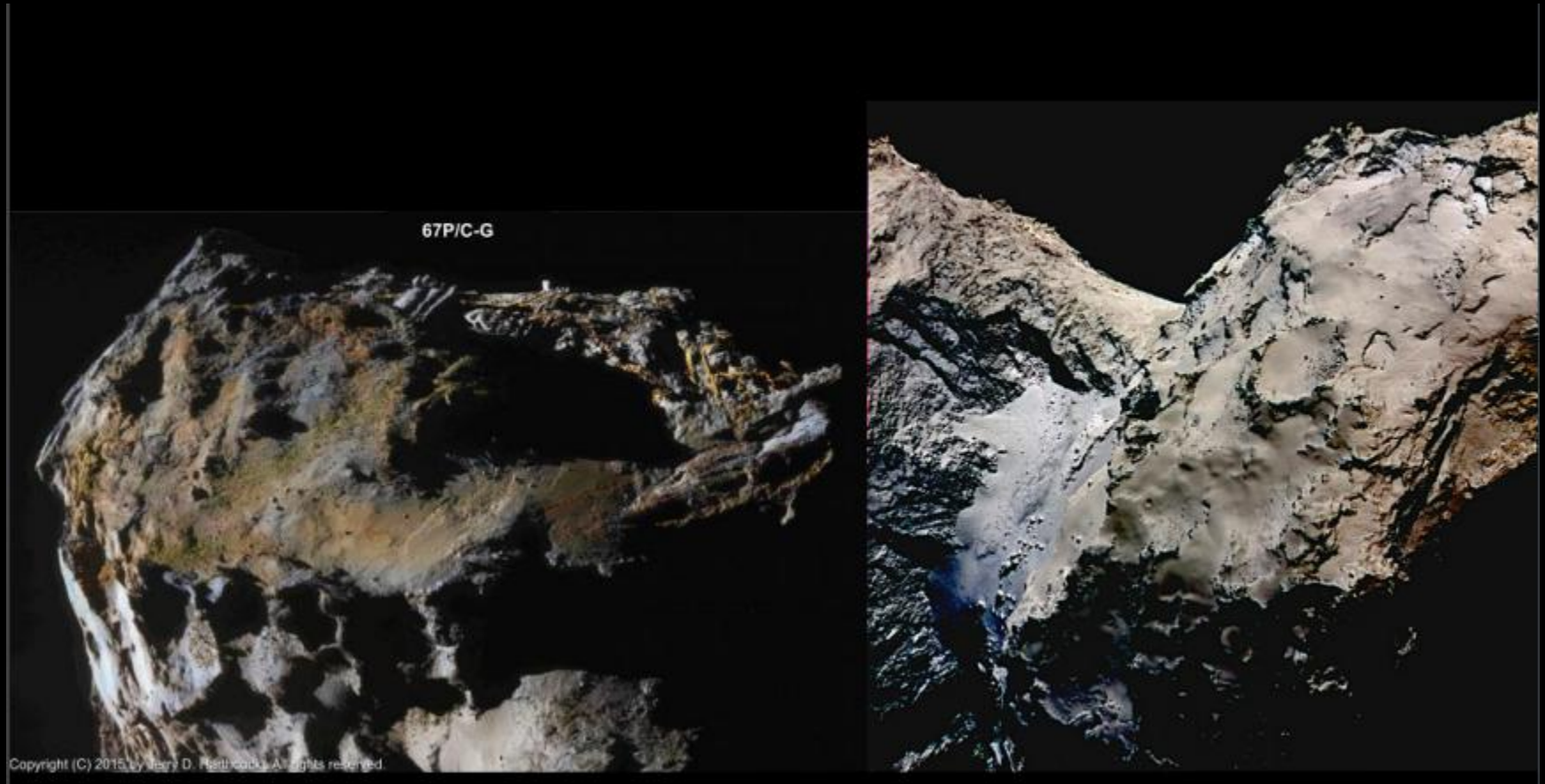
Cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko



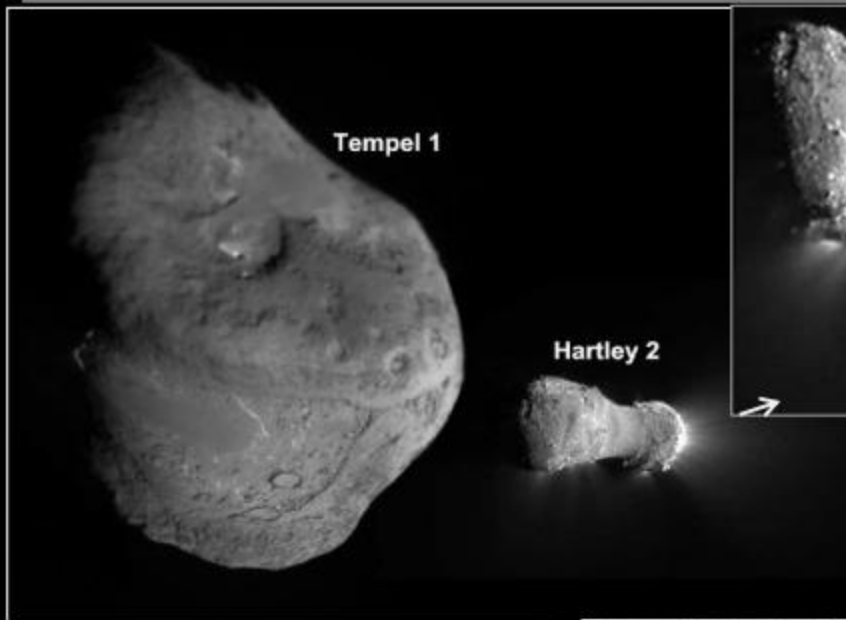
Cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko



Cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko



Cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko



9P/ Tempel 1

7,6 km × 4,9 km;

albedo = 0,04

Missão Deep Impact -
04/07/2005

103/P Hartley 2

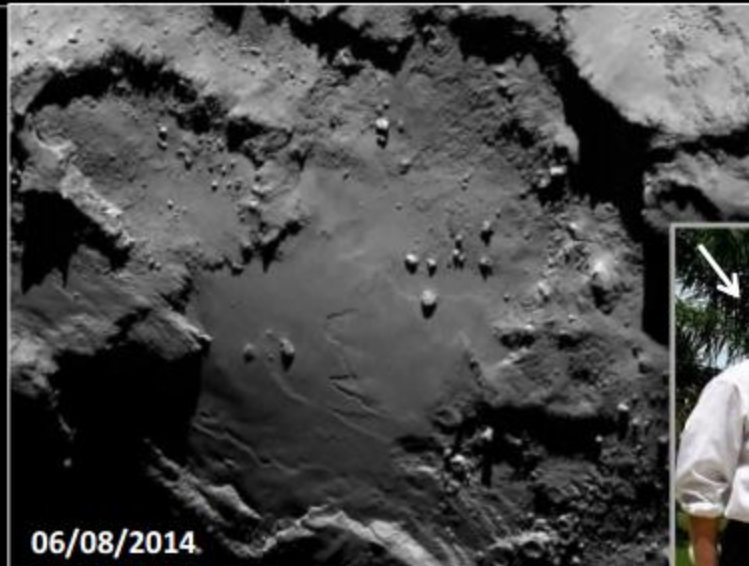
0,57 km;

albedo = 0,028

Missão EPOXI - 13/12/2007

67P/Churyumov-Gerasimenko

23/08/2014



3 km x 5 km;
Missão Rosetta



Cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko

$$M = 10^{23} \text{ kg}$$

$$V = 11 \text{ km /s (veloc. mínima)}$$

$$E_{\text{cinética}} \approx 6 \times 10^{20} \text{ J}$$

$$\approx 1,5 \times 10^{11} \text{ ton de TNT}$$

Potência comprovada da bomba TSAR,
a mais potente: 50 Megaton

