

Conceitos Fundamentais da Física do Sistema Solar (MPA5004)

Enos Picazzio (IAGUSP)

## COMETAS



Depois de passar o periélio, o cometa McNaught (C/2006 P1) desenvolveu uma cauda estupidamente grande, em forma de leque, lembrando o Grande Cometa de 1744.

## Os cometas no cenário histórico



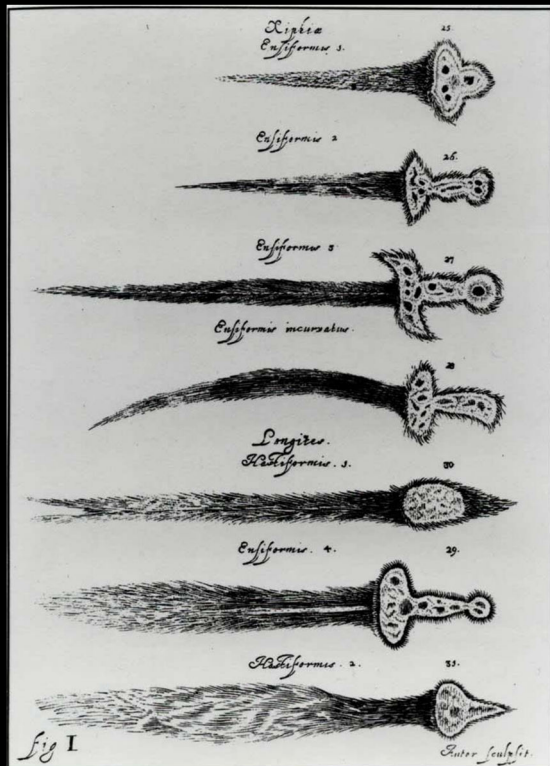
"[O elmo de Aquiles brilhou] como a estrela vermelha, que a partir de seu cabelo flamejante despejou doença, peste e guerra" (Ilíada, Bk. XIX, 11, 380-3).

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

Para o homem primitivo, um cometa era algo a ser temido, um presságio de um desastre iminente. Como os cometas brilham quando se aproximam do Sol e porque os cometas brilhantes (visíveis a olho nu) são relativamente raros, os cometas apareceriam no céu repentina e inesperadamente. Além disso, perto do **periélio**, as caudas de cometas podem se estender por milhões de quilômetros no espaço (tornando-os os maiores objetos do Sistema Solar), portanto, dependendo da geometria da órbita, a cauda pode ter um comprimento bem grande. Em uma época em que o reino celestial era o reino dos deuses, o aparecimento repentino de um objeto desconhecido que dominava o céu noturno era aterrorizante. Na Era Grega, a natureza dos cometas era intensamente debatida, mas o tema do medo era predominante, como visto nesta citação cometária do maior autor grego da antiguidade, Homero: "[O elmo de Aquiles brilhava] como a estrela vermelha, que de seus cabelos flamejantes sacode doenças, pestes e guerras" (*Iliad*, Bk. XIX, 11, 380-3).

Fonte: <http://www.ifa.hawaii.edu/~meech/education/psr/History.html>

## Os cometas no cenário histórico



Tipos de formas de  
cometas

Ilustrações de  
Cometographia

Johannes Hevelius  
(Danzig, 1668)

NASA / JPL

Quando as pessoas que viviam em culturas antigas olhavam para cima, os cometas eram os objetos mais notáveis no céu noturno. Os cometas eram diferentes de qualquer outro objeto no céu noturno. Enquanto a maioria dos corpos celestes viaja pelos céus em intervalos regulares e previsíveis, tão regulares que as constelações podem ser mapeadas e previstas, os movimentos dos cometas sempre pareceram muito erráticos e imprevisíveis. Isso levou pessoas de muitas culturas a acreditar que os deuses ditavam seus movimentos e os enviavam como uma mensagem. O que os deuses estavam tentando dizer? Algumas culturas leem a mensagem pelas imagens que viram ao olhar para o cometa. Por exemplo, em algumas culturas, a cauda do cometa parecia a cabeça de uma mulher, com cabelos esvoaçantes atrás dela. Este símbolo triste de luto foi entendido como significando que os deuses que enviaram o cometa à Terra estavam descontentes. Outros pensavam que o cometa alongado parecia uma espada de fogo brilhando no céu noturno, um sinal tradicional de guerra e morte. Tal mensagem dos deuses só poderia significar que sua ira logo seria desencadeada sobre o povo da terra. Tais ideias causaram medo naqueles que viram cometas disparando pelo céu. A semelhança do cometa, no entanto, não foi a única coisa que inspirou o medo.

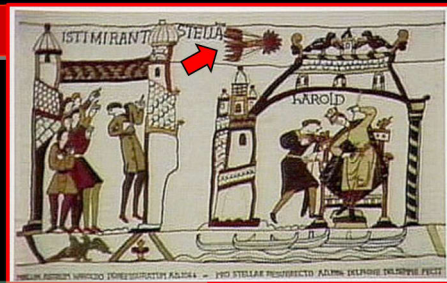
Fonte: <http://deepimpact.umd.edu/science/comets-cultures.html#caption1>



## 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

A tapeçaria de Bayeux consiste na justaposição de nove peças de roupa. As linhas usadas no bordado são nove.

A tapeçaria mostra 126 personagens principais e cada cena é acompanhada de uma breve descrição em latim. A parte final da tapeçaria (que mede cerca de 90 a 200 cm) está faltando e provavelmente representou a coroação de William.

### A invasão normanda

Um aspecto da Tapeçaria de Bayeux mostra o cometa Halley em 1066. O Cometa de Halley apareceu antes de outra batalha significativa - Hastings. Guilherme de Jumièges, um monge normando, descreveu-o como tendo uma "cauda de três bifurcações" e sugeriu que "pressagiava, como muitos disseram, uma mudança em algum reino". Quando apareceu pela primeira vez na Inglaterra e na Normandia, em abril de 1066, diz-se que o duque William da Normandia observou "É um sinal maravilhoso do céu". Ele já tinha o apoio do papa para invadir a Inglaterra, e esse sinal lhe assegurava que Deus apoiaria sua reivindicação ao trono inglês.

Em setembro de 1066, o rei inglês Harold Godwinson marchou com seu exército para o norte, para Yorkshire, onde derrotou o rei norueguês invasor Harald Hardrada na Batalha de Stamford Bridge. Ele então correu para o sul para encontrar os normandos, que haviam acabado de desembarcar perto de Hastings.

Harold foi morto na batalha, provavelmente por uma flecha no olho, e Guilherme da Normandia tornou-se Guilherme I da Inglaterra. Isso marcou o fim do domínio anglo-saxão sobre a Inglaterra e o início do domínio normando sobre os ingleses.

Fonte: <https://spacecentre.co.uk/blog-post/halleys-comet-shaped-history/>



## Os cometas no cenário cósmico

Corpos pequenos e congelados que orbitam o Sol.

Percorrem grandes distâncias.

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

*E eles se aproximam da Terra!*

Cometa Hale-Bopp (C/1995 O1)

**Cometa**, um pequeno corpo que orbita o Sol com uma fração substancial de sua composição composta por voláteis congelados. Quando um cometa se aproxima do Sol, os voláteis sublimam (passam diretamente da fase sólida para a fase gasosa) e formam, junto com as partículas de poeira, uma atmosfera brilhante que envolve o núcleo sólido, conhecida como coma. À medida que a poeira e o gás da coma fluem livremente para o espaço, o cometa forma duas caudas, uma composta de moléculas neutras e radicais ionizados e outra de poeira. A palavra *cometa* vem do grego *κομητης* (*kometes*), que significa "cabelos compridos".

Os cometas estão entre os objetos mais espetaculares do céu, com sua coma brilhante e suas longas caudas de poeira, de gases. Os cometas podem aparecer aleatoriamente de qualquer direção e fornecer uma exibição fabulosa e em constante mudança por muitos meses, enquanto se movem em órbitas altamente excêntricas ao redor do Sol.

Os cometas são importantes porque são corpos primitivos que sobraram da formação do sistema solar. Eles estavam entre os primeiros corpos sólidos a se formar na nebulosa solar, a nuvem interestelar de poeira e gás da qual o Sol e os planetas se formaram. Cometas foram formados nas regiões externas da nebulosa solar, (mais precisamente do disco protoplanetário), onde estava frio o suficiente para que os gelados voláteis se condensassem. Geralmente, considera-se que ultrapassa 5 unidades astronômicas (AU; 748 milhões de km ou 465 milhões de milhas) ou além da órbita de Júpiter. Assim, eles retêm um registro físico e químico da nebulosa solar primordial e dos processos envolvidos na formação dos sistemas planetários.

Fonte: <https://www.britannica.com/science/comet-astronomy>

## Os cometas no cenário cósmico



C/ 1995 O1 (Hale-Bopp)

As aparências são diversificadas não só entre diferentes cometas, mas de um mesmo cometa em diferentes posições de sua órbita e em suas sucessivas aparições, se for periódico.

C/1975 V1 (West)

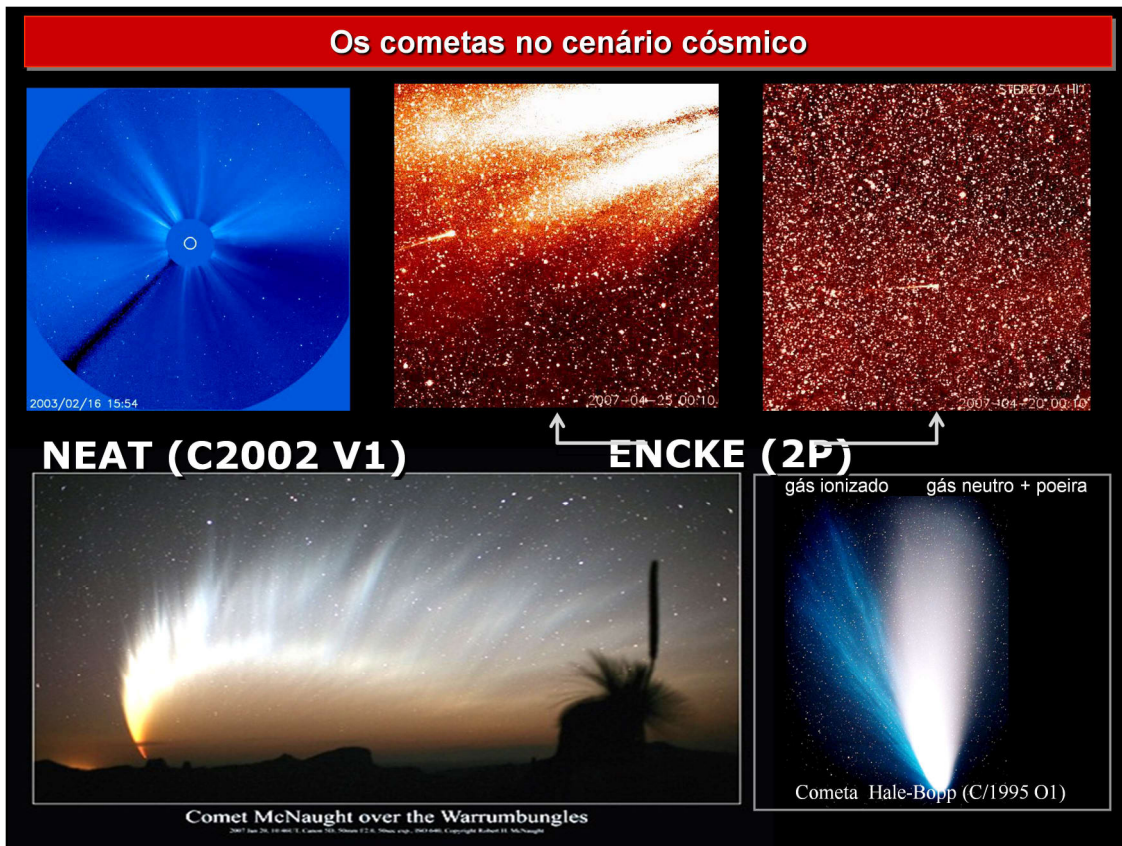


C/2001 A2 (Linear)



As aparências visuais dos cometas são muito diversificadas. Mesmo para um mesmo cometa, a aparência muda am cada vez que passa pelo Sol.diferentes voltas em torno do Sol.

De maneira genérica, pode-se dizer que tudo depende da composição física, ou seja, se tem ou não muitas espécies químicas congeladas que serão sublimadas pelo calor, se tem muita poeira imersas nos gelos que serão sublimados, se está próximo do Sol (que é o momento em que produzirá coma e caudas), depende da distância em que está da Terra e mesmo da geometria (cometa-Sol-Terra) em que o observamos. Isso tudo tem a ver, em parte, com o período orbital. Um cometa de longo período ou mesmo novo tem muita matéria para produzir coma a caudas; um cometa periódico tem órbita relativamente pequena e fica mais tempo circulando o Sol, logo perde com mais agilidade seu conteúdo gasoso e poeira.



Cometa NEAT (C/2002 V1): As imagens e filmes do cometa NEAT são fora do comum, com uma cauda considerável e um núcleo muito brilhante (saturado), sendo atingido por uma grande Ejeção de Massa Coronal (CME) durante a passagem periélica.

As caudas de íons dos cometas fluem constantemente para longe do Sol, empurradas pelo vento solar movendo-se a cerca de 400 quilômetros por segundo.

Cometa Encke (2P/): Um Windsock Solar Observado pelo STEREO da NASA

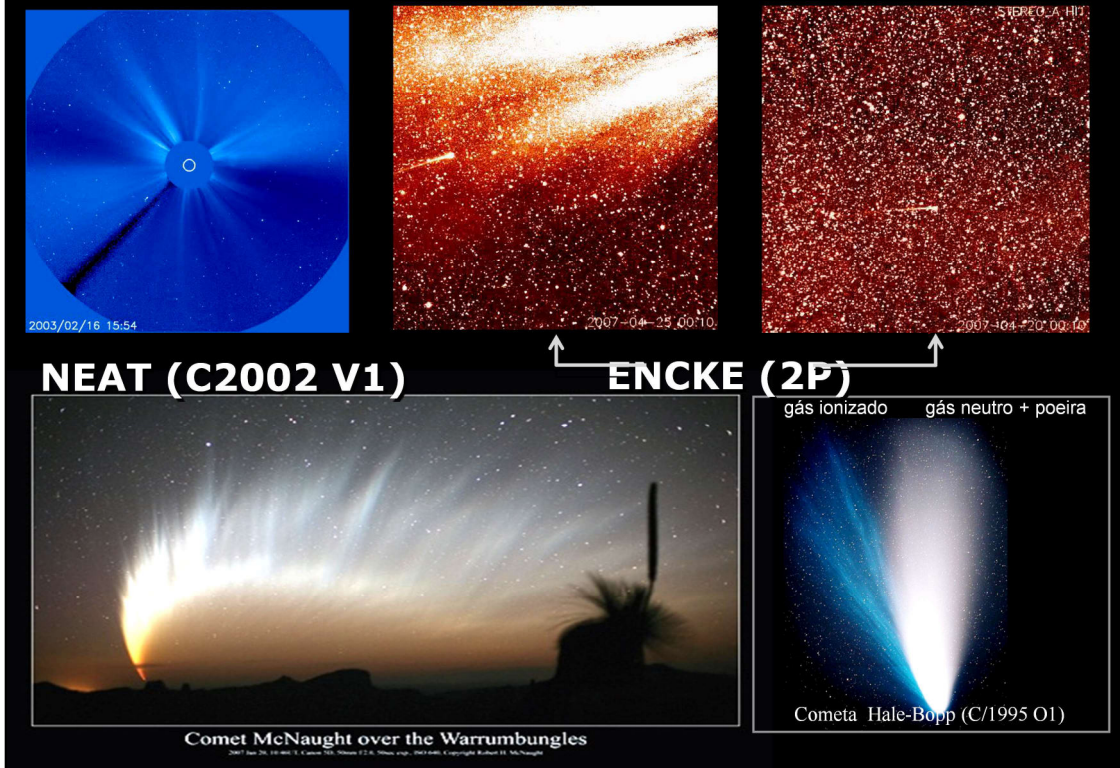
As caudas ionizadas de cometas podem ser usadas como sondas do vento solar - o fluxo constante de material que deixa o Sol em todas as direções. De acordo com novos estudos de uma cauda de cometa observada pelo Observatório de Relações Solares e Terrestres da NASA, ou STEREO, o vácuo do espaço interplanetário é preenchido com turbulência e vórtices em turbilhão semelhantes às rajadas de vento na Terra. Essa turbulência pode ajudar a explicar duas das características mais curiosas do vento: sua natureza variável e temperaturas inesperadamente altas.

O vento solar é feito de elétrons e íons com carga elétrica e também carrega o campo magnético interplanetário ao longo do trajeto de expansão, provocando uma conexão magnética entre o Sol, Terra e todos os demais objetos do Sistema Solar que possuam magnetosfera ou componente ionizada, como os cometas.

Crédito – <http://www.nasa.gov/>



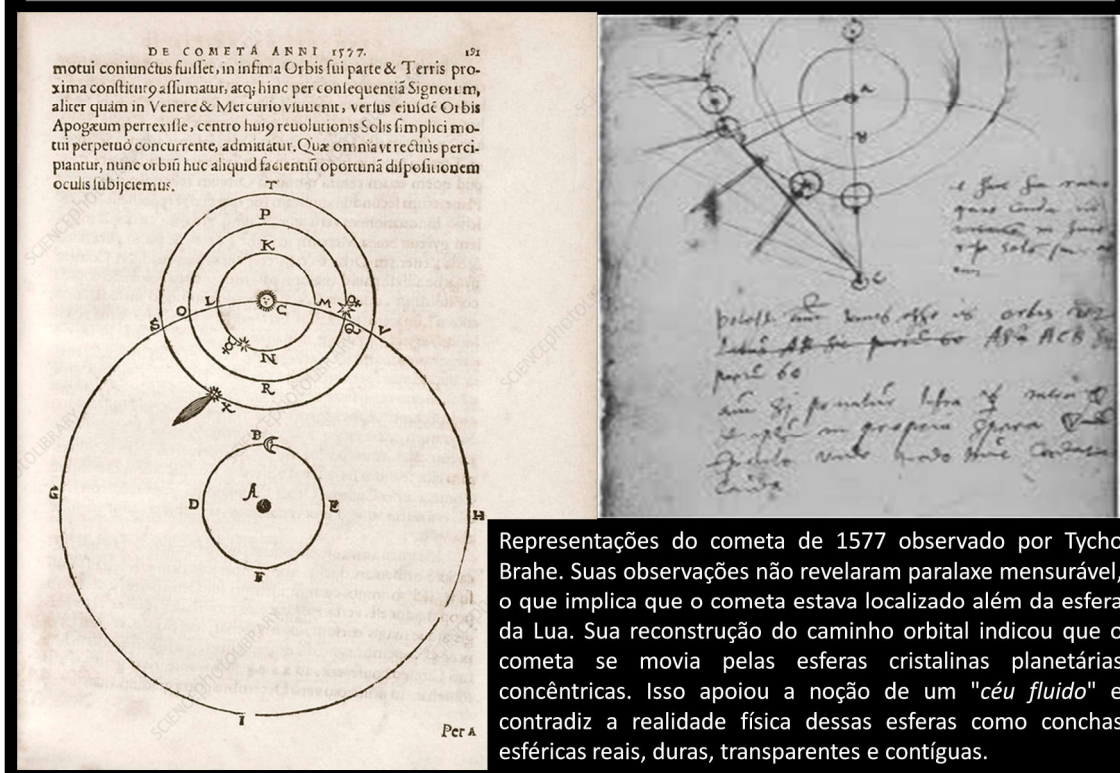
## Os cometas no cenário cósmico



Estudando os movimentos de regiões densas de gás ionizado brilhante na cauda do cometa Encke, notou-se que as flutuações no vento solar são refletidas na cauda e, por isso, permitem reconstruir o movimento do vento solar, calcular a energia associada à turbulência e conhecer a variabilidade do vento solar durante um ciclo solar.

Crédito – <http://www.nasa.gov/>

## Tycho Brahe: descobre que cometas são objetos celestes



O cometa de 1577.

Esta é uma das representações do cometa de 1577 observado por Tycho, que permaneceu visível de novembro de 1577 a janeiro de 1578. Suas observações não revelaram paralaxe mensurável, o que implica que o cometa estava localizado além da esfera da Lua.

Sua reconstrução do caminho orbital do cometa, desde o clareamento, escurecimento e deslocamento em relação às estrelas de fundo, indicou que o cometa se movia pelas esferas cristalinas planetárias concêntricas. Isso apoiou a noção de um "céu fluido" e contradiz a realidade física dessas esferas como conchas esféricas reais, duras, transparentes e contíguas.

O caminho do cometa é traçado dentro do sistema planetário de Tycho, onde todos os planetas orbitam em torno do Sol, com o último orbitando uma Terra fixa. O caminho do cometa atravessa esferas planetárias, das quais Tycho concluiu que as referidas esferas não poderiam ser objetos sólidos e cristalinos, como assumido por Aristóteles. Como Nicolaus Copernicus e outros astrônomos anteriores, Tycho se apegou firmemente à noção de órbitas perfeitamente circulares para todos os corpos celestes; Johannes Kepler seria o primeiro a romper com essa teoria em particular.

Fonte: <https://www2.hao.ucar.edu/Education/FamousSolarPhysicists/tycho-brahes-observations-instruments>

## Edmund Halley descobre a periodicidade dos cometas

[http://starchild.gsfc.nasa.gov/images/StarChild/learning\\_center/people/Halley.gif](http://starchild.gsfc.nasa.gov/images/StarChild/learning_center/people/Halley.gif)



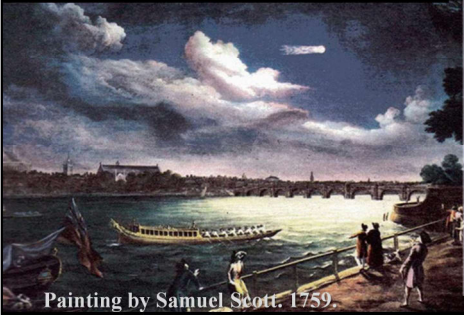
Edmond Halley: percebe que os cometas observados em 1682, em 1607 (por Johannes Kepler) e em 1531 (por Petrus Apianus) e que tinham características orbitais semelhantes. Com períodos entre 75 e 76 anos.

Levando em consideração as perturbações orbitais que esse cometa iria sofrer devido à atração dos planetas, sobretudo de Júpiter e Saturno, Edmond Halley previu o seu regresso em 1758.

A previsão estava certa: o cometa foi visto em 25/12/1758 e passou pelo periélio em 13/03/1759. O atraso foi de 618 dias, calculado pelos matemáticos franceses Alexis Claude de Clairault, Joseph Lalande e Nicole-Reine Lepaute.

Edmond Halley faleceu em 1742.

Há registros chineses do cometa Halley datando do século 5 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<sup>o</sup>, 2<sup>o</sup>, 3<sup>o</sup>... cometas descobertos
  - A, B, C ... respectivamente, 1<sup>a</sup> metade de Janeiro, 2<sup>a</sup> metade de Janeiro, 1<sup>a</sup> metade de Fevereiro...
  - 1995 - ano da descoberta

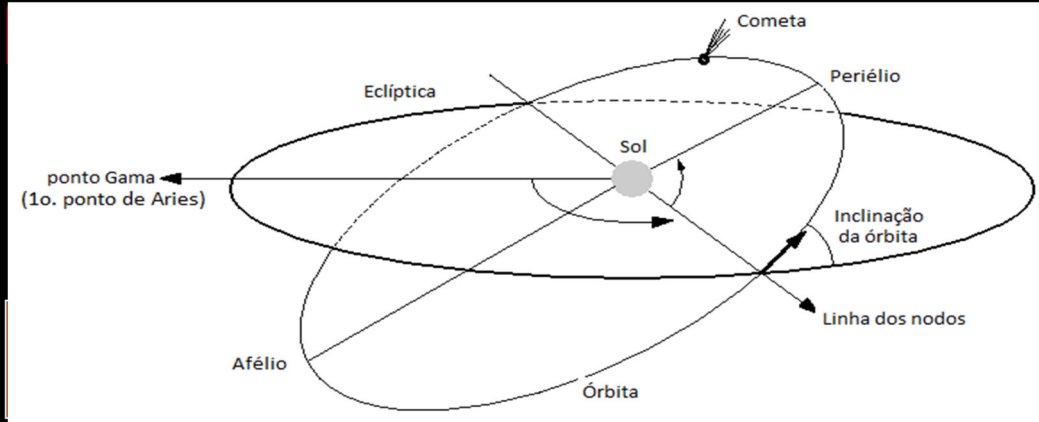
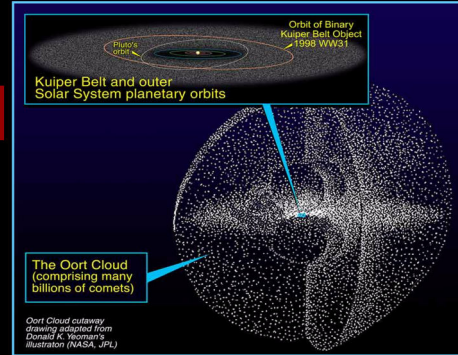
### Exemplos de novas designações:

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)

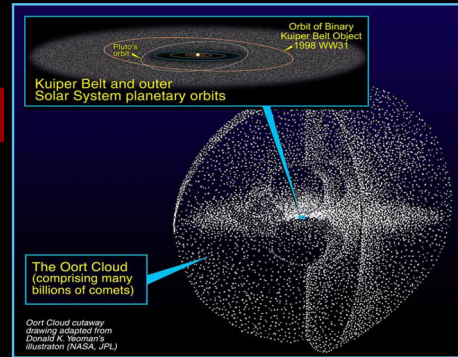


As dimensões e a distância da parte externa da Nuvem de Oort ainda carece de consenso. Porém todos os cometas que orbitam o Sol dentro dela têm períodos longuíssimos. Os que saem da nuvem e dirigem-se às partes internas do Sistema Solar chegam como cometas novos (porque nunca foram observados antes), com órbitas muito excêntricas e de todas as direções. As inclinações dos planos orbitais são diversificadas, o que torna a esférica a distribuição. Inclinações superiores a  $90^\circ$  tornam o movimento do cometa retrógrado.

## 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 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

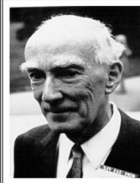
Os cometas de curto período têm órbitas mais próximas do plano da eclíptica. Os períodos mais curtos são os dos cometas 2P/Encke(3,3 anos) e 311P/PANSTARRS (3,2) classificado como cometa do cinturão principal dos asteroides.



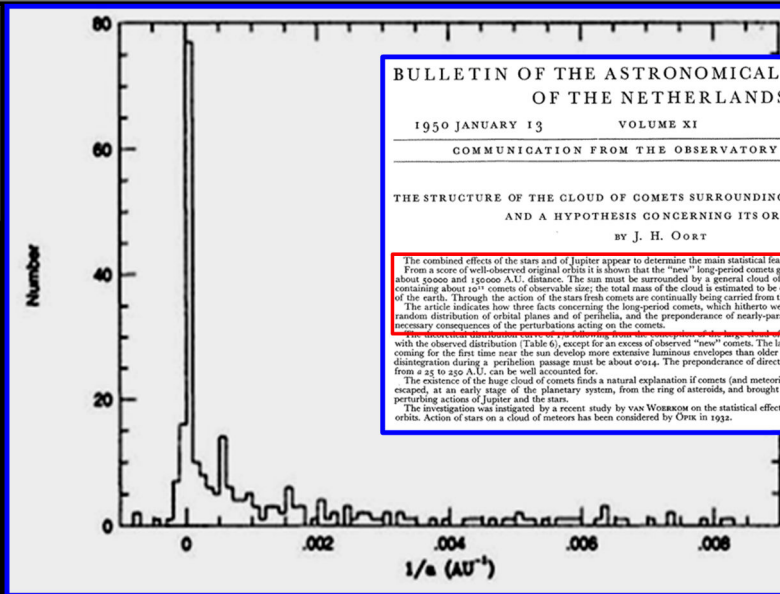
### Qualquer teoria deve explicar:

- As **elevadas excentricidades** ( $e$ ) 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.

## Cometas de período longo – Nuvem de Oort



Jan Hendrik Oort  
1900-1992



BULLETIN OF THE ASTRONOMICAL INSTITUTES  
OF THE NETHERLANDS

1950 JANUARY 13 VOLUME XI NUMBER 408

COMMUNICATION FROM THE OBSERVATORY AT LEIDEN

THE STRUCTURE OF THE CLOUD OF COMETS SURROUNDING THE SOLAR SYSTEM,  
AND A HYPOTHESIS CONCERNING ITS ORIGIN,

BY J. H. OORT

The combined effects of the stars and of Jupiter appear to determine the main statistical features of the orbits of comets. From a score of well-observed original orbits it is shown that the "new" long-period comets generally come from regions between about 50000 and 150000 A.U. distance. The sun must be surrounded by a general cloud of comets with a radius of this order, containing about  $10^{11}$  comets of observable size; the total mass of the cloud is estimated to be of the order of  $1/10$  to  $1/100$  of that of the earth. Through the action of the stars fresh comets are continually being carried from this cloud into the vicinity of the sun. The article indicates how three facts concerning the long-period comets, which hitherto were not well understood, namely the random distribution of orbital planes and of perihelia, and the preponderance of nearly-parabolic orbits, may be considered as necessary consequences of the perturbations acting on the comets.

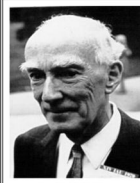
The combined effects of the stars and of Jupiter appear to determine the main statistical features of the orbits of comets. From a score of well-observed original orbits it is shown that the "new" long-period comets generally come from regions between about 50000 and 150000 A.U. distance. The sun must be surrounded by a general cloud of comets with a radius of this order, containing about  $10^{11}$  comets of observable size; the total mass of the cloud is estimated to be of the order of  $1/10$  to  $1/100$  of that of the earth. Through the action of the stars fresh comets are continually being carried from this cloud into the vicinity of the sun. The article indicates how three facts concerning the long-period comets, which hitherto were not well understood, namely the random distribution of orbital planes and of perihelia, and the preponderance of nearly-parabolic orbits, may be considered as necessary consequences of the perturbations acting on the comets.

O astrônomo holandês Jan Oort demonstrou a existência de uma nuvem esférica composta de cometas com menos de 100 km de diâmetro, talvez trilhões deles, com uma massa total estimada de 10 a 100 vezes a da Terra. Embora distante demais para ser vista diretamente, acredita-se que seja a fonte da maior parte do longo período historicamente observado de cometas que levam mais de 200 anos (e geralmente muito mais tempo) para orbitar o Sol. A maioria dos cometas de curto período, que levam menos tempo para completar uma órbita, vem de outra fonte, o cinturão de Kuiper.

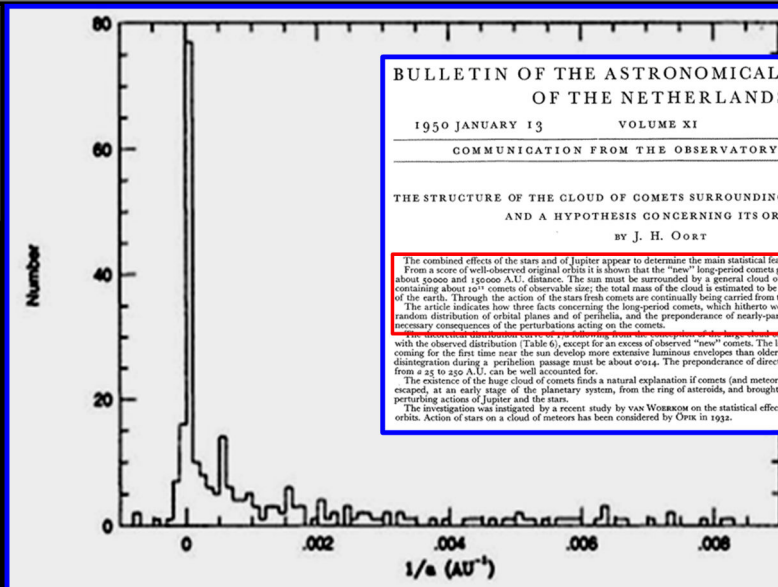
O astrônomo estoniano Ernest J. Öpik, em 1932, sugeriu a possível presença de um reservatório distante de cometas, argumentando que, porque os cometas se desgastam (perdem massa) relativamente rápido em suas passagens através do Sistema Solar interno, deve existir uma fonte de cometas "íntegros", que reabastecem constantemente os fornecimento de cometa. Embora esses cometas nunca tenham estado no interior do Sistema Solar antes, eles são difíceis de distinguir dos cometas de longo período mais antigos porque, quando são observados pela primeira vez, suas órbitas já foram gravitacionalmente perturbadas pelos planetas exteriores. Em 1950, Oort conseguiu calcular as órbitas originais de 19 cometas. Seus cálculos mostraram que 10 deles eram cometas íntegros (1ª passagem próxima do Sol), provenientes da mesma distância extremamente grande e, portanto, que um reservatório de cometa distante deveria existir.

Fonte: <https://www.britannica.com/science/Oort-cloud>

## Cometas de período longo – Nuvem de Oort



Jan Hendrik Oort  
1900-1992



BULLETIN OF THE ASTRONOMICAL INSTITUTES  
OF THE NETHERLANDS

1950 JANUARY 13 VOLUME XI NUMBER 408

COMMUNICATION FROM THE OBSERVATORY AT LEIDEN

THE STRUCTURE OF THE CLOUD OF COMETS SURROUNDING THE SOLAR SYSTEM,  
AND A HYPOTHESIS CONCERNING ITS ORIGIN,  
BY J. H. OORT

The combined effects of the stars and of Jupiter appear to determine the main statistical features of the orbits of comets. From a score of well-observed original orbits it is shown that the "new" long-period comets generally come from regions between about 50000 and 150000 A.U. distance. The sun must be surrounded by a general cloud of comets with a radius of this order, containing about  $10^{11}$  comets of observable size; the total mass of the cloud is estimated to be of the order of  $1/10$  to  $1/100$  of that of the earth. Through the action of the stars fresh comets are continually being carried from this cloud into the vicinity of the sun. The article indicates how three facts concerning the long-period comets, which hitherto were not well understood, namely the random distribution of orbital planes and of perihelia, and the preponderance of nearly-parabolic orbits, may be considered as necessary consequences of the perturbations acting on the comets. The investigation was instigated by a recent study by VAN WOEKORP on the statistical effect of Jupiter's perturbations on comet orbits. Action of stars on a cloud of meteors has been considered by OPIK in 1932.

The combined effects of the stars and of Jupiter appear to determine the main statistical features of the orbits of comets. From a score of well-observed original orbits it is shown that the "new" long-period comets generally come from regions between about 50000 and 150000 A.U. distance. The sun must be surrounded by a general cloud of comets with a radius of this order, containing about  $10^{11}$  comets of observable size; the total mass of the cloud is estimated to be of the order of  $1/10$  to  $1/100$  of that of the earth. Through the action of the stars fresh comets are continually being carried from this cloud into the vicinity of the sun. The article indicates how three facts concerning the long-period comets, which hitherto were not well understood, namely the random distribution of orbital planes and of perihelia, and the preponderance of nearly-parabolic orbits, may be considered as necessary consequences of the perturbations acting on the comets.

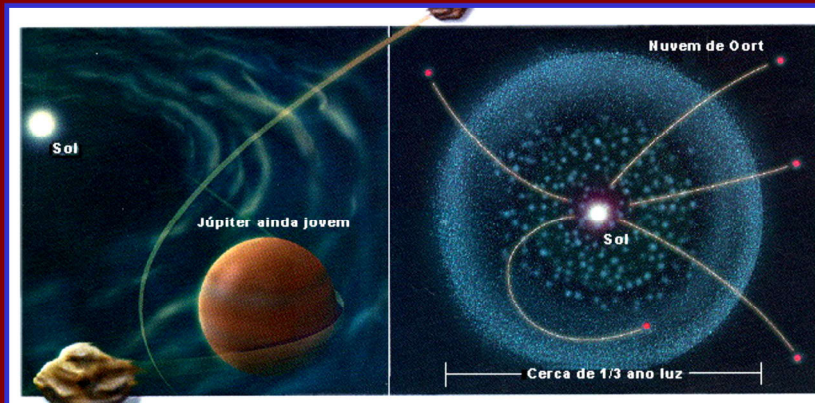
Posteriormente, usando um número muito maior de órbitas observadas, o astrônomo americano Brian Marsden calculou que a parte da nuvem de Oort está entre 40.000 e 50.000 unidades astronômicas do Sol. A tais distâncias, as órbitas dos minúsculos corpos gelados podem ser alteradas, enviando os cometas da nuvem para a região interna por um dos dois processos: a passagem ocasional de uma estrela ou nuvem molecular interestelar gigante próxima ao Sistema Solar ou as forças gravitacionais, chamadas marés de disco, exercidas pela massa do disco galáctico. Embora a parte interna da nuvem de Oort, que se pensa ter cerca de 20.000 UA, não forneça cometas, sua existência e grande massa são previstas pela teoria da origem do Sistema Solar. A nuvem de Oort deve ter sido criada a partir de gelo planetesimais que originalmente se acumularam na parte externa do disco protoplanetário e depois foram dispersos pela gravidade dos planetas gigantes incipientes. Não se sabe até que ponto a nuvem de Oort se estende para o espaço, embora os resultados de Marsden sugiram que ela esteja quase vazia além de 50.000 UA, o que representa cerca de um quinto da distância da estrela mais próxima.

Fonte: <https://www.britannica.com/science/Oort-cloud>



## Cometas, Objetos do Cinturão 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



### Formação

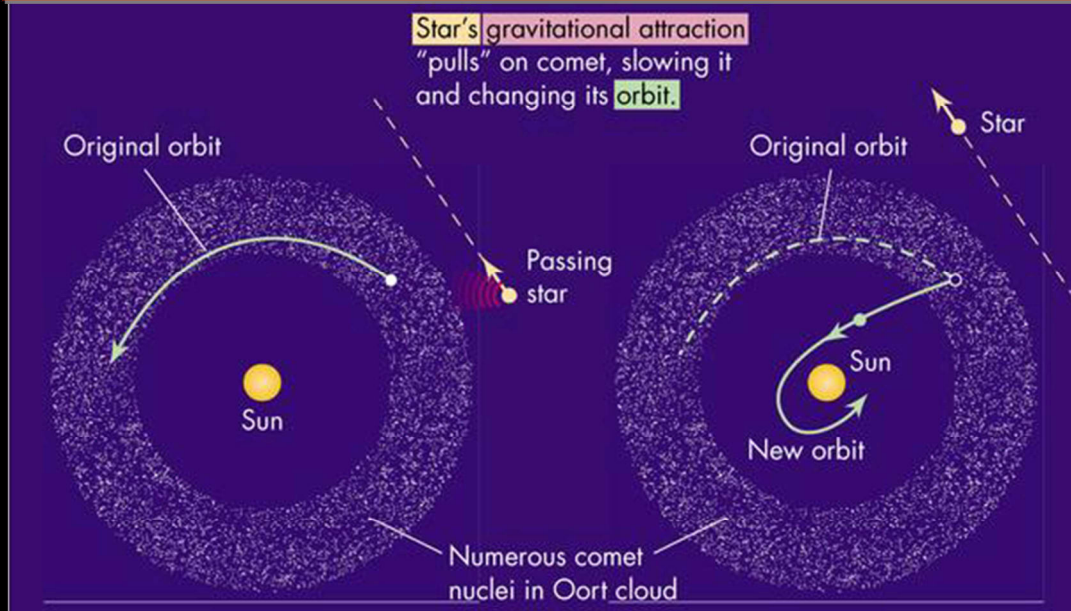
A ideia principal para a formação da Nuvem de Oort diz que esses objetos gelados nem sempre estavam tão longe do Sol. Depois que os planetas se formaram a 4,6 bilhões de anos atrás, a região em que se formaram ainda continha muitos objetos restantes chamados planetesimais. Os planetesimais são formados do mesmo material que os planetas. A gravidade dos planetas (principalmente Júpiter) espalhou os planetesimais em todas as direções.

Alguns planetesimais foram totalmente expulsos do Sistema Solar, enquanto outros foram lançados em órbitas excêntricas, onde ainda eram mantidos pela gravidade do Sol, mas estavam suficientemente longe para que as influências galácticas também os puxassem. Provavelmente a influência mais forte foi a força da maré da própria galáxia.

Em suma, a gravidade dos planetas afastou muitos planetesimais gelados do Sol, e a gravidade da galáxia provavelmente os levou a se estabelecer nas fronteiras do Sistema Solar, onde os planetas não podiam mais perturbá-los. E eles se tornaram o que chamamos agora de Nuvem de Oort. Novamente, essa é a ideia principal, mas a Nuvem de Oort também pode capturar objetos que não se formam no Sistema Solar.

Fonte: <https://solarsystem.nasa.gov/solar-system/oort-cloud/in-depth/>

## Cometas de período longo – Nuvem de Oort

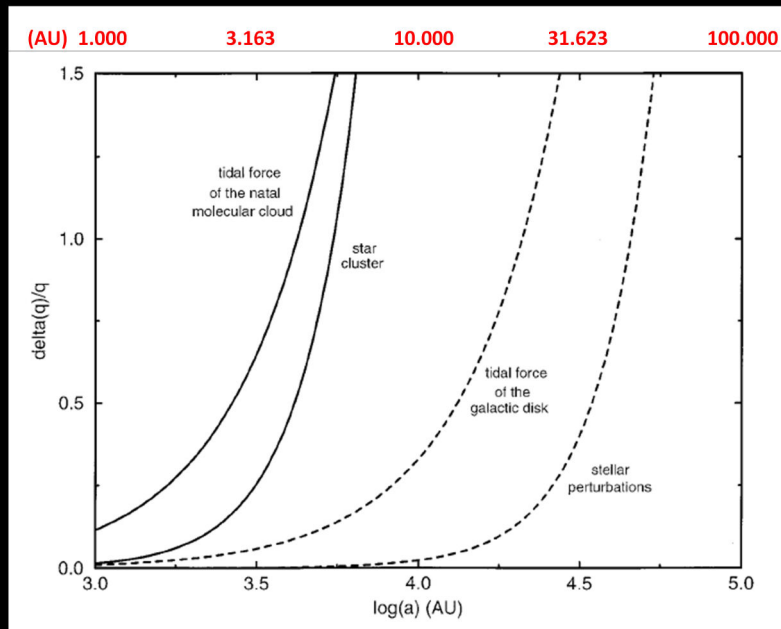


Os cometas orbitam o Sol dentro da Nuvem de Oort. Os movimentos do Sol e das estrelas na Galáxia podem perturbar essas órbitas e parte dos cometas são desviados para as regiões internas do Sistema Solar e, com isso, sofrerem novas perturbações pelos planetas, sobretudo os grandes.

Os cometas da Nuvem de Oort podem ser perturbados pela gravidade das estrelas vizinhas durante o trajeto do Sol em torno do núcleo da Via Láctea (por vezes chamada apenas de Galáxia). Todas as estrelas no disco da Via Láctea compartilham um movimento comum ao redor do centro da galáxia, mas também se movem umas em relação às outras. As estrelas se aproximam de direções aleatórias. Dessa interação, cometas da nuvem podem ser desviados para o interior do Sistema Solar ou mesmo para fora dele, rumo ao espaço interestelar.

## Cometas de período longo – Nuvem de Oort

### Forças que podem perturbar cometas da Nuvem de Oort



Cometas que habitam a Nuvem de Oort, pode, de tempos em tempos, cair no interior do Sistema Solar e ficar sob o controle gravitacional dos planetas, tornando-se *os cometas de longo período*. Mas quais são os mecanismos físicos que podem realmente fazer cometas deixarem a nuvem de Oort puxando-os para dentro do Sistema Solar interno ou lançando-os para o espaço interestelar?

Em primeiro lugar, os cometas da Nuvem de Oort podem ser perturbados pela gravidade das estrelas que passam. Todas as estrelas no disco da Via Láctea compartilham um movimento comum ao redor do centro da galáxia, mas também se movem uma em relação à outra. As estrelas se aproximam de direções aleatórias; portanto, as mudanças de velocidade às vezes são positivas, às vezes negativas. O efeito combinado é uma perturbação caótica da velocidade, de modo que, após a passagem de 10.000 estrelas, a órbita original do cometa foi drasticamente alterada.

Quanto tempo isso leva? A resposta depende de onde na Nuvem de Oort vem o cometa. Acredita-se que a maioria dos cometas vem da borda externa da nuvem, onde a atração pelo Sol é fraca e as estrelas que passam têm efeitos maiores. Mais perto do Sol, os cometas são firmemente retidos e nunca podem ser deslocados pela gravidade das estrelas que passam.

Outras perturbações pode ocorrer, tais como a gravidade do disco da Via Láctea em si que pode perturbar as órbitas de cometas na Nuvem de Oort, com um efeito comparável em tamanho ao de estrelas de passagem.

Assim, o Sol pode perturbar os objetos da Nuvem de Oort (em ocasiões muito raras, ao passar por uma Nuvem Molecular Gigante), causando uma chuva de cometas na chuva no sistema planetário interno. Outro mecanismo possível para fazer cometas deixarem a nuvem de Oort pode ser a onda de choque de um evento explosivo, como uma supernova.

Fonte: <http://spaceguard.rm.iasf.cnr.it/NScience/neo/neo-what/com-oort.htm>

## Comportamento em órbita

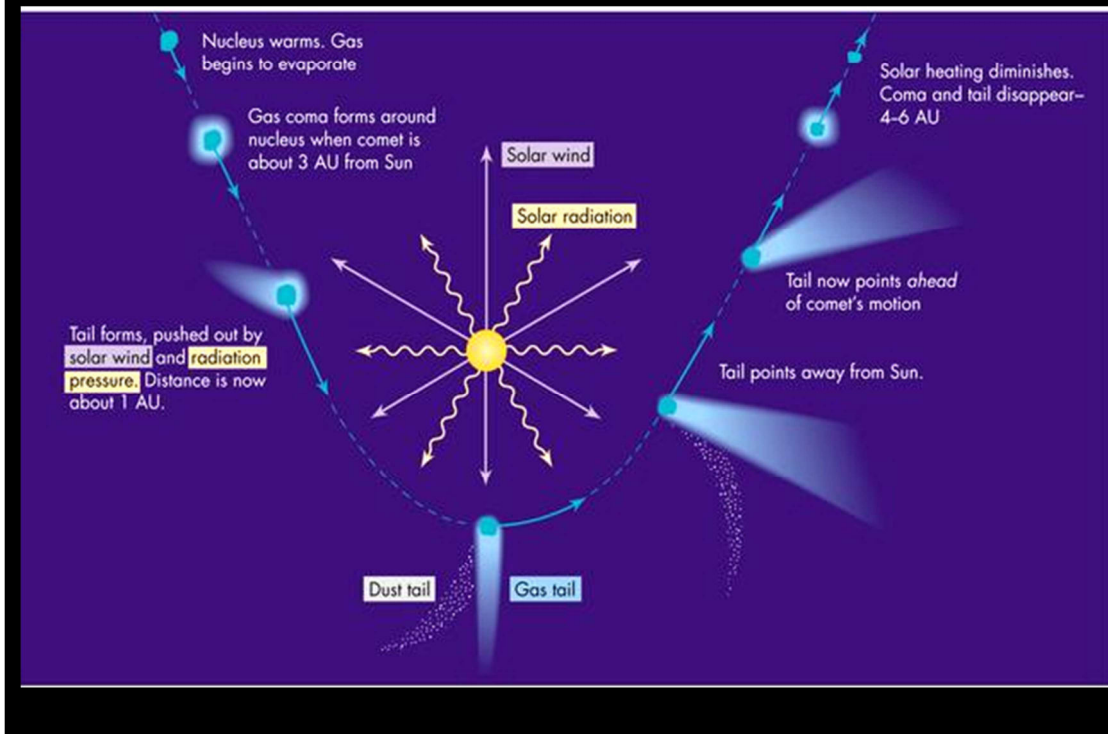


Ilustração esquemática das componentes de um cometa típico.

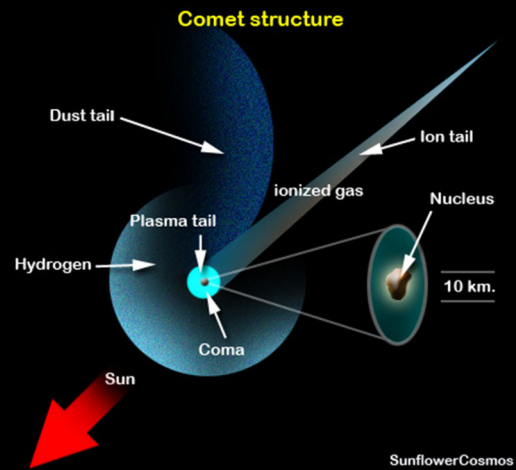


## Estrutura dos cometas

[http://www.sunflowercosmos.org/solar\\_system/comet\\_images/comet\\_structure.jpg](http://www.sunflowercosmos.org/solar_system/comet_images/comet_structure.jpg)

### 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.

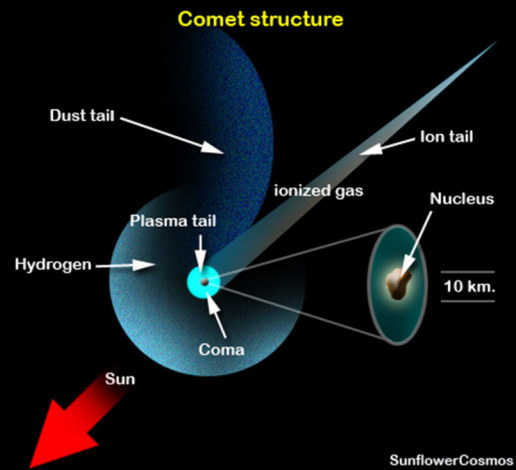


## Estrutura dos cometas

[http://www.sunflowercosmos.org/solar\\_system/comet\\_images/comet\\_structure.jpg](http://www.sunflowercosmos.org/solar_system/comet_images/comet_structure.jpg)

### 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:  $\text{CO}^+$ ,  $\text{N}_2^+$ ,  $\text{CO}_2^+$ ,  $\text{CH}^+$



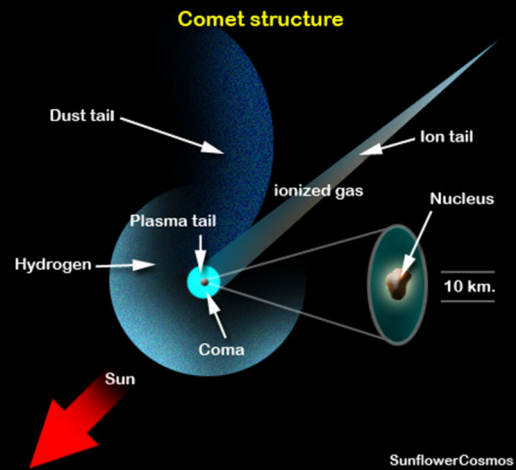
## Estrutura dos cometas

[http://www.sunflowercosmos.org/solar\\_system/comet\\_images/comet\\_structure.jpg](http://www.sunflowercosmos.org/solar_system/comet_images/comet_structure.jpg)

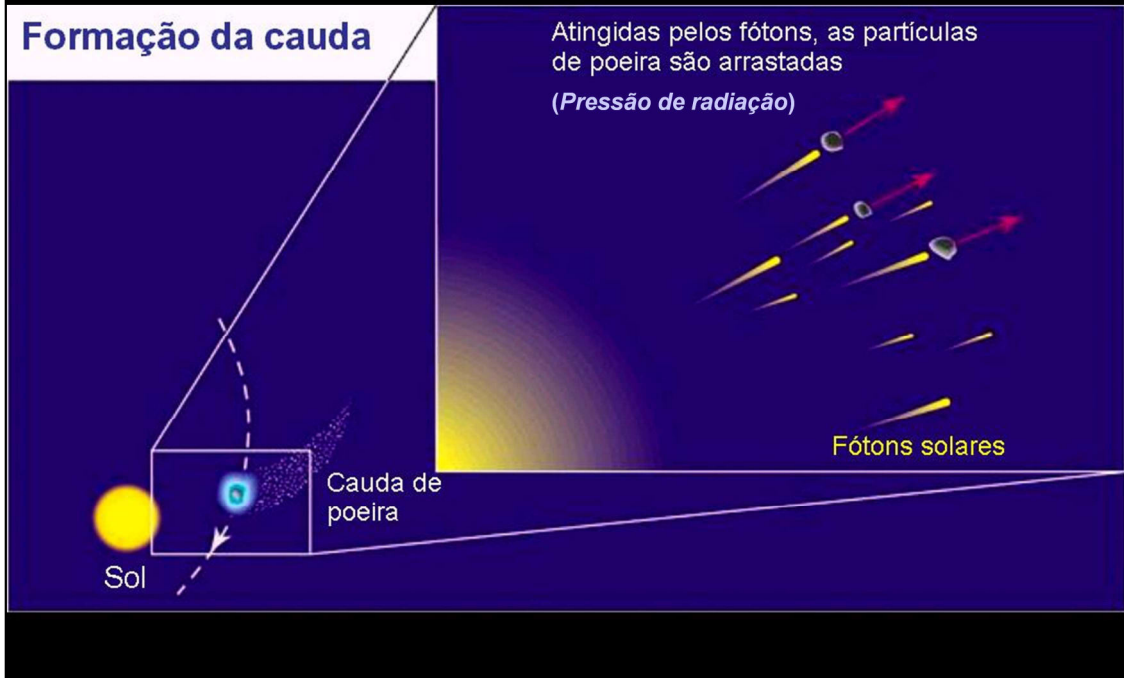
### Envelope de Hidrogênio

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



A radiação eletromagnética exerce uma pressão minuciosa sobre tudo o que encontra. Isso é conhecido como **pressão de radiação** e pode ser pensado como a transferência de momento dos fótons à medida que atingem a superfície do objeto.

Em situações cotidianas, essa pressão é insignificante, mas nos arredores do Sol ela pode se tornar importante, dadas as vastas quantidades de fótons emitidos.

A pressão dos fótons solares é responsável pela aceleração das partículas de poeira dos cometas criando as caudas de poeira. Note que a poeira vem do cometa, a pressão de radiação apenas dá o formato alongado da cauda. A pressão de radiação também é a força motriz por trás do conceito de velas solares. Quanto maior for a área da vela, mais eficiente será o mecanismo. Se a vela for feita de material refletor leve, os fótons exercem uma pressão de radiação suficiente para mover a sonda.

Fonte: <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/R/Radiation+Pressure>

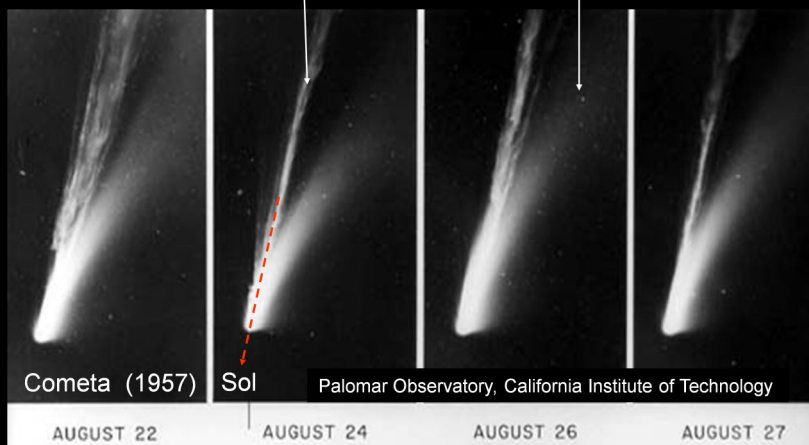


## Estrutura dos cometas

### As caudas do Cometa Mrkos

**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.

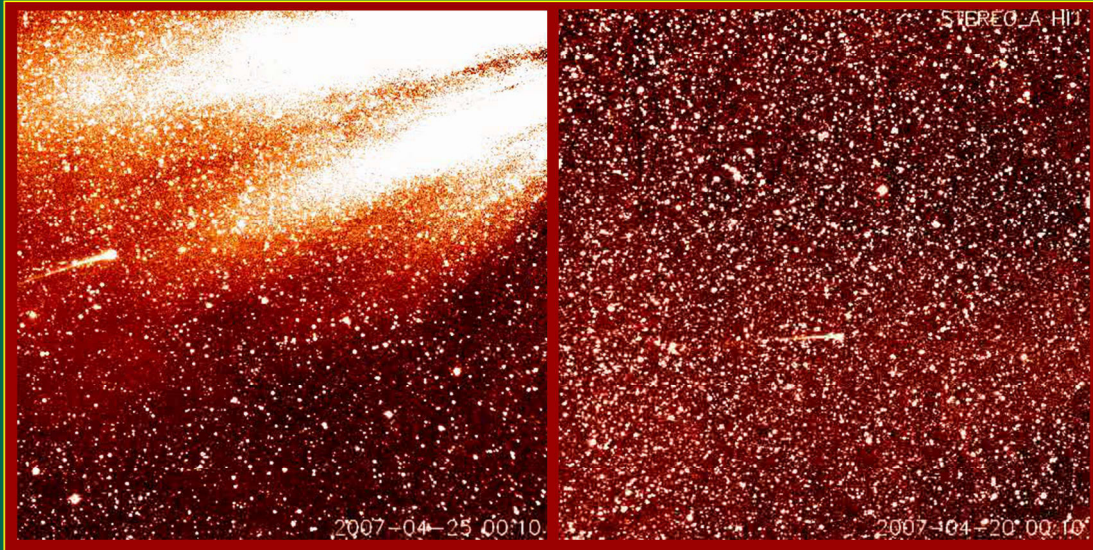


Na aproximação do cometa as caudas estendem-se na direção contrária a do movimento do cometa. No afastamento ocorre o oposto.

Dois tipos de cauda de cometa:

	"Gás" ou "Íon"	Poeira
<b>Tipo</b>	"Gás" ou "Íon"	Poeira
<b>Formato</b>	Quase retilíneo, mas desajeitado curvada, suave	Delicadamente
<b>Orientação</b>	Apontado diretamente para longe do Sol, por ação do vento solar	Geralmente apontada para do Sol, mas bem mais
<b>Estado de Ionização</b>	Ionizado	Neutro
<b>Cor</b>	Azul	Branco
<b>Espectro</b>	Com linhas de emissão	Luz solar refletida

## Tempestade solar interage com cauda ionizada



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

Cometa NEAT (C/2002 V1): As imagens e filmes do cometa NEAT são fora do comum, com uma cauda considerável e um núcleo muito brilhante (saturado), sendo atingido por uma grande Ejeção de Massa Coronal (CME) durante a passagem periélica.

As caudas de íons dos cometas fluem constantemente para longe do Sol, empurradas pelo vento solar movendo-se a cerca de 400 quilômetros por segundo.

Cometa Encke (2P/): Um Windssock Solar Observado pelo STEREO da NASA

As caudas ionizadas de cometas podem ser usadas como sondas do vento solar - o fluxo constante de material que deixa o Sol em todas as direções. De acordo com novos estudos de uma cauda de cometa observada pelo Observatório de Relações Solares e Terrestres da NASA, ou STEREO, o vácuo do espaço interplanetário é preenchido com turbulência e vórtices em turbilhão semelhantes às rajadas de vento na Terra. Essa turbulência pode ajudar a explicar duas das características mais curiosas do vento: sua natureza variável e temperaturas inesperadamente altas.

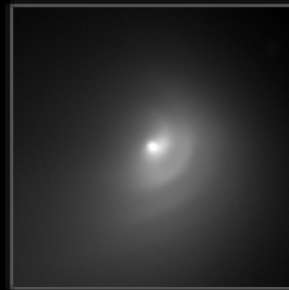
O vento solar é feito de elétrons e íons com carga elétrica e também carrega o campo magnético interplanetário ao longo do trajeto de expansão, provocando uma conexão magnética entre o Sol, Terra e todos os demais objetos do Sistema Solar que possuam magnetosfera ou componente ionizada, como os cometas.

Estudando os movimentos de regiões densas de gás ionizado brilhante na cauda do cometa Encke, notou-se que as flutuações no vento solar são refletidas na cauda e, por isso, permitem reconstruir o movimento do vento solar, calcular a energia associada à turbulência e conhecer a variabilidade do vento solar durante um ciclo solar.

Crédito – <http://www.nasa.gov/>

## 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.



National Astronomical  
Observatory of Japan

## Composição

### Espécies químicas mais abundantes

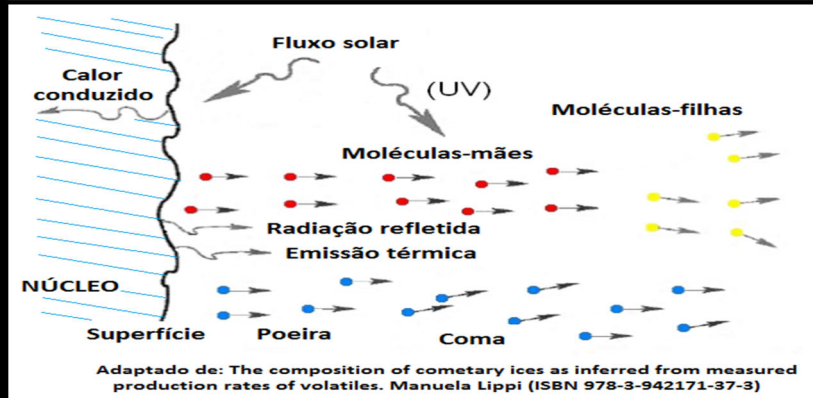
$H_2O$ ,  $NH_3$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$ ,  $C_2H_2$ ,  $CN$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  
 $CH$ ,  $NH$ ,  $NH_2$ ,

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

Poeira

### Composição básica:

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



$H_2O$  – água;  $NH_3$  – amônia;  $CH_4$  – metano;  $CO_2$  – dióxido de carbono;  $C_2H_2$  – acetileno;  $CN$  – radical cianogênio;  $C_2$  – carbono diatômico;  $C_3$  – carbono triatômico;  $CH$  – radical metilidino;  $NH$  – mono-hidrido de nitrogênio;  $NH_2$  – radical amino.

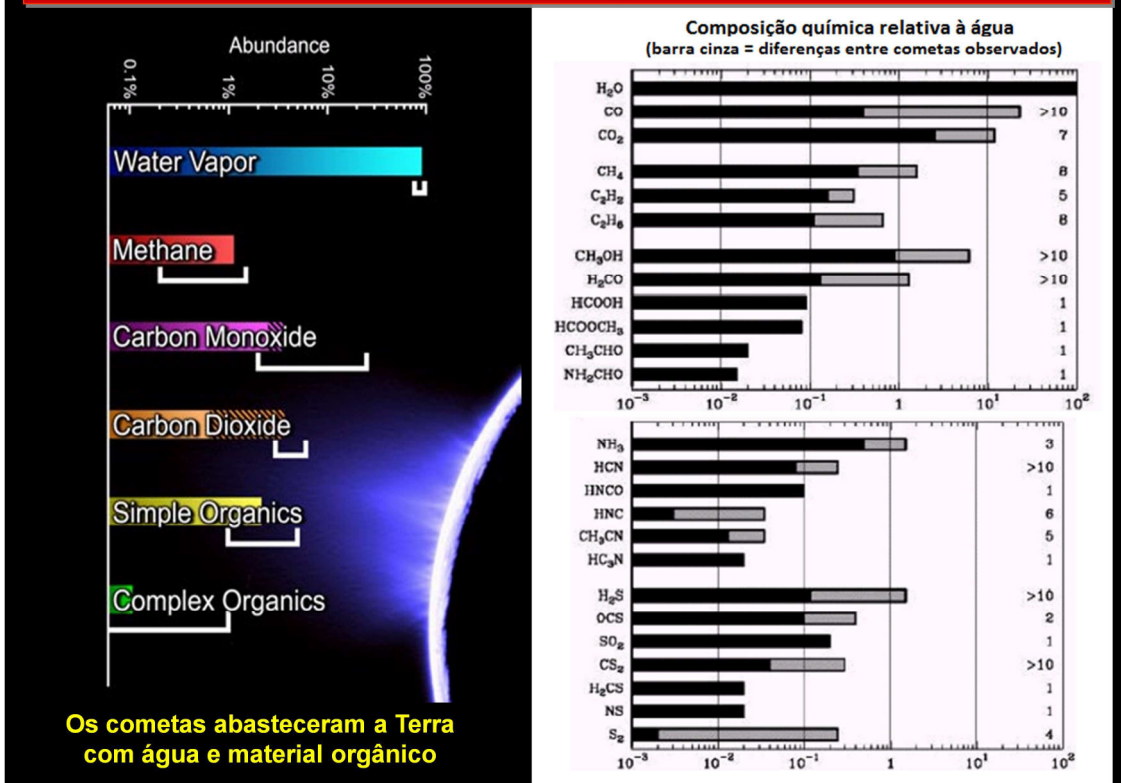
O principal processo pelo qual o material é liberado do núcleo é a sublimação induzida pelo aquecimento solar. Moléculas que são liberadas diretamente do núcleo são chamadas moléculas-mãe, enquanto as criadas posteriormente, por fotodissociação de moléculas-mãe pela radiação solar, são chamadas moléculas-filha.

Devido à sua natureza, espera-se que as moléculas progenitoras sejam mais representativas da composição nuclear e devem fornecer informações fundamentais sobre as propriedades químicas de um cometa. A espectroscopia das moléculas filhas fornece informações complementares para a química e a física da coma, e a abundância das moléculas-mães dessas espécies pode ser relacionada, usando modelos adequados. Infelizmente, para algumas espécies filhas, a identidade do correspondente progenitor permanece ambíguo ou desconhecido, e a espectroscopia das moléculas progenitoras permanece a melhor maneira de deduzir a composição interna do núcleo.

Fonte: <https://www.mps.mpg.de/phd/theses/the-composition-of-cometary-ices-as-inferred-from-measured-production-rates-of-volatiles>

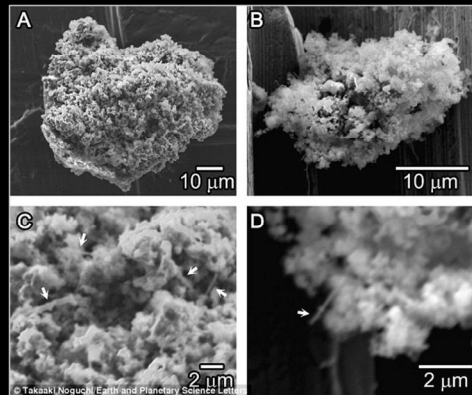
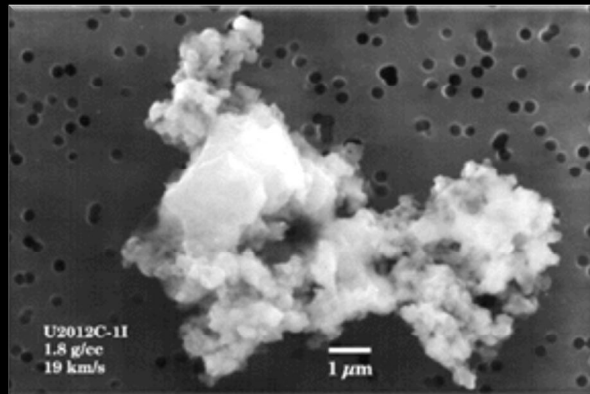
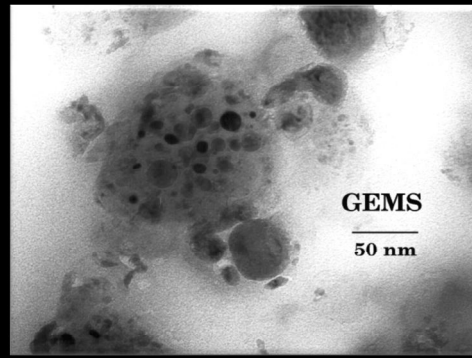


## Composição



Moléculas detectadas em cometas por espectroscopia e suas abundâncias em relação à água. As barras em **preto** mostram a faixa de abundância medida em cometas. As barras em **cinza** indicam a diversidade da composição entre os cometas. O número de cometas nos quais as medições de abundância estão disponíveis é indicado à direita.

## Constituição dos grãos



[http://web.gps.caltech.edu/classes/ge133/slides/lec21\\_16nov2011.ppt](http://web.gps.caltech.edu/classes/ge133/slides/lec21_16nov2011.ppt)

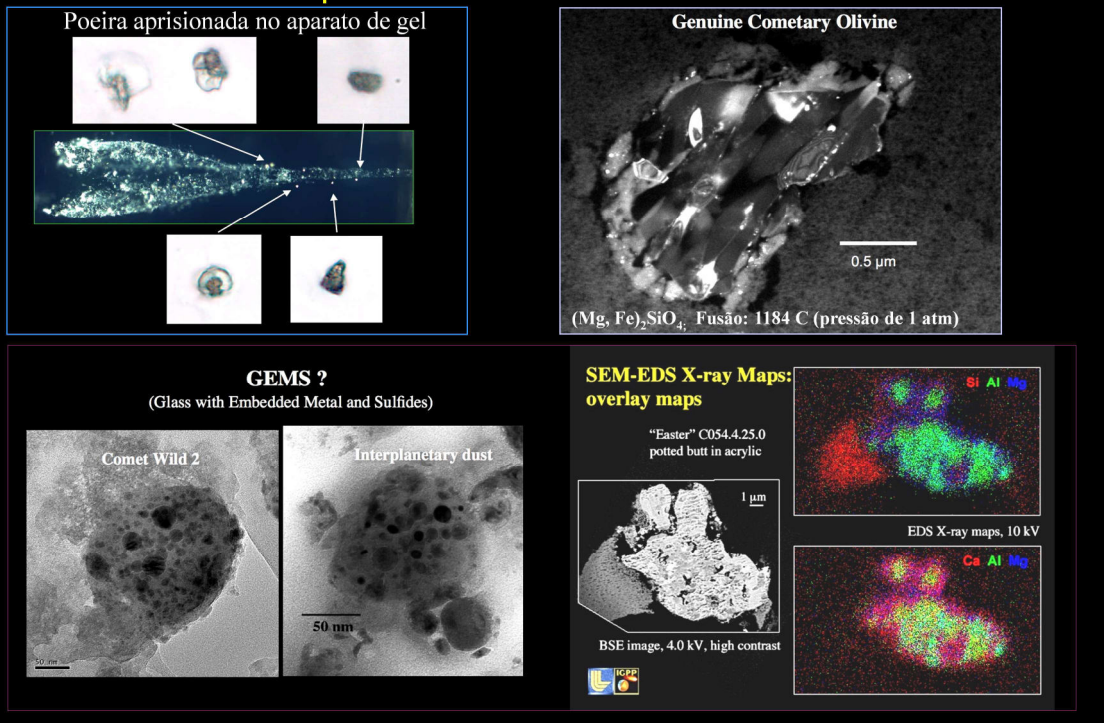
Imagens de microscópio eletrônico de partículas de meteorito encontradas no gelo antártico ao redor do ponto de Tottuki, que continham os mesmos minerais, compostos metálicos e estruturas encontrados na poeira do cometa.

<http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2865197/Comet-dust-Earth-s-surface-time-Microscopic-particles-discovered-58-feet-ancient-Antarctic-ice.html#ixzz5Dayh5Pg4>

Follow us: @MailOnline on Twitter | DailyMail on Facebook

## Missões cometárias

### a poeira do cometa 81P/ Wild 2



A sonda Stardust, que voou a menos de 250 quilômetros do cometa Wild 2 em janeiro de 2004, trouxe amostras do material rochoso do cometa. As amostras devolvidas mostram materiais de alta temperatura da parte mais fria do nosso sistema solar, como a partícula mostrada no canto superior direito, que é composta pelo forsterito, um mineral de silicato que pode ser encontrado na Terra em gemas chamadas peridot. Os cometas podem não ser tão simples quanto as nuvens de gelo, poeira e gases que os formariam. Parece que os cometas são uma mistura de materiais formados a todas as temperaturas, em locais muito próximos do Sol e em locais muito remotos". Eles podem ser diversos com histórias complexas e variadas. Wild 2 parece ser um exemplo dessa complexidade. As amostras Wild 2 têm outros materiais de alta temperatura contendo cálcio, alumínio e titânio.

Fonte: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/stardust/news/stardust-20060313.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/stardust/news/stardust-20060313.html)



## Moléculas do Meio Interestelar

### Molecular inventory

2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
H <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	c-C <sub>3</sub> H	C <sub>5</sub>	C <sub>5</sub> H	C <sub>6</sub> H	CH <sub>3</sub> C <sub>3</sub> N	CH <sub>3</sub> C <sub>4</sub> H	CH <sub>3</sub> C <sub>5</sub> N?	HC <sub>9</sub> N	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	HC <sub>11</sub> N
AlF	C <sub>2</sub> H	I-C <sub>3</sub> H	C <sub>4</sub> H	I-H <sub>2</sub> C <sub>4</sub>	CH <sub>2</sub> CHCN	HCOOCH <sub>3</sub>	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CN	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> CO			
AlCl	C <sub>2</sub> O	C <sub>3</sub> N	C <sub>4</sub> Si	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	CH <sub>3</sub> C <sub>2</sub> H	CH <sub>3</sub> COOH	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> O	HOCH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> OH			
C <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> O	I-C <sub>3</sub> H <sub>2</sub>	CH <sub>3</sub> CN	HC <sub>5</sub> N	C <sub>7</sub> H	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> OH	NH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> COOH			
CH	CH <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S	c-C <sub>3</sub> H <sub>2</sub>	CH <sub>3</sub> NC	HCOCH <sub>3</sub>	H <sub>2</sub> C <sub>6</sub>	HC <sub>7</sub> N				
CH <sup>+</sup>	HCN	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	CH <sub>2</sub> CN	CH <sub>3</sub> OH	NH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	CH <sub>2</sub> OHCHO	C <sub>8</sub> H				
CN	HCO	CH <sub>2</sub> D <sup>+</sup> ?	CH <sub>4</sub>	CH <sub>3</sub> SH	c-C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>					
CO	HCO <sup>+</sup>	HCCN	HC <sub>3</sub> N	HC <sub>3</sub> NH <sup>+</sup>	CH <sub>2</sub> CHOH						
CO <sup>+</sup>	HCS <sup>+</sup>	HCNH <sup>+</sup>	HC <sub>2</sub> NC	HC <sub>2</sub> CHO							
CP	HOC <sup>+</sup>	HNCO	HCOOH	NH <sub>2</sub> CHO							
CSi	H <sub>2</sub> O	HNCS	H <sub>2</sub> CHN	C <sub>5</sub> N							
HCl	H <sub>2</sub> S	HOCO <sup>+</sup>	H <sub>2</sub> C <sub>2</sub> O								
KCl	HNC	H <sub>2</sub> CO	H <sub>2</sub> NCN								
NH	HNO	H <sub>2</sub> CN	HNC <sub>3</sub>								
NO	MgCN	H <sub>2</sub> CS	SiH <sub>4</sub>								
NS	MgNC	H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>	H <sub>2</sub> COH <sup>+</sup>								
NaCl	N <sub>2</sub> H <sup>+</sup>	NH <sub>3</sub>									
OH	N <sub>2</sub> O	SiC <sub>3</sub>									
PN	NaCN	CH <sub>3</sub>									
SO	OCS										
SO <sup>+</sup>	SO <sub>2</sub>										
SiN	c-SiC <sub>2</sub>										
SiO	CO <sub>2</sub>										
SIS	NH <sub>2</sub>										
CS	H <sub>3</sub> <sup>+</sup>										
HF	SiCN										
SH	AiNC										
FeO?	H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>										
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 cyanopolyne series – cyanoacetylene (HC<sub>3</sub>N) – is ubiquitous in molecular clouds, and another member – cyanodecapentayne (HC<sub>11</sub>N) – 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](http://www.astrochemistry.net).



## Missões cometárias

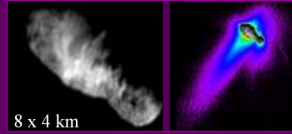
1P/Halley  
[Giotto 1985]  
*1a. observação por sonda espacial*  
(danificada pela poeira).  
Período ~75 a.;



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:

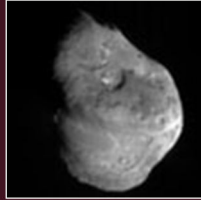
4/7/2004

Período:

~ 5,5 a.

Tamanho:

4 x 14 km ?



Cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko

[Rosetta 2004 – 2015]

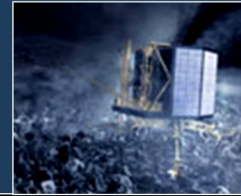
*1o. registro in loco da atividade*

Pouso em nov/2014.

Registro até dez/2015.

Período ~6,6 a.

Tamanho: 4 km



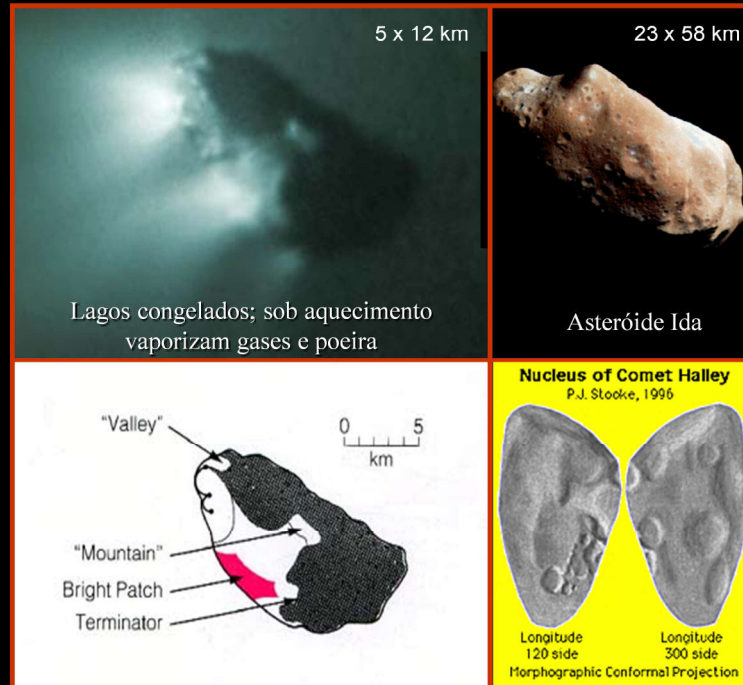
## Missões cometárias

### 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.

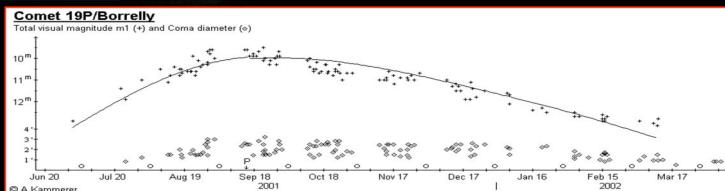
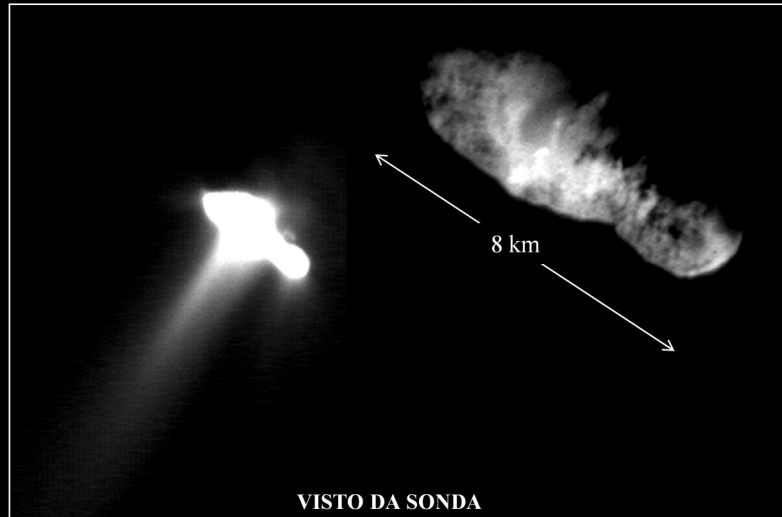
Esquema do núcleo, baseado nas imagens

(créditos: European Space Agency; Max Planck Institute for Aeronomie, Bell Aerospace Corporation)



## Missões cometárias

### o núcleo do 19/P Borrelly

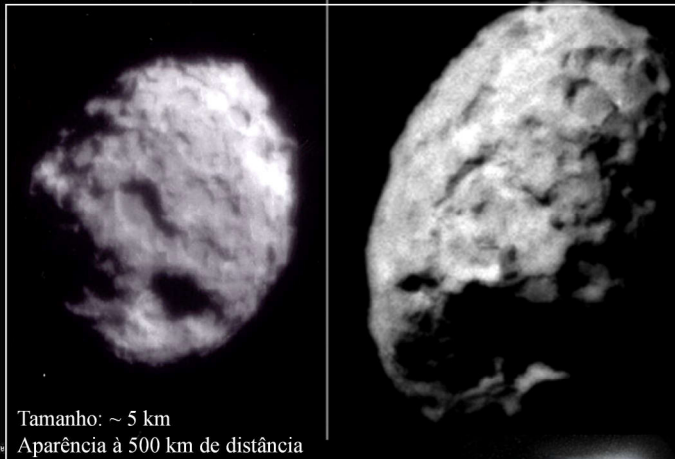
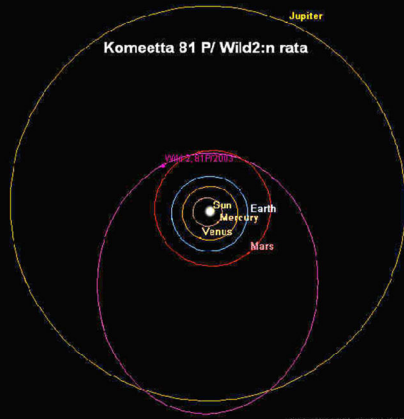


As imagens da sonda Deep Space 1 da NASA mostra características do núcleo do cometa Borrelly, jatos de poeira escapando do núcleo e a coma em forma de nuvem de poeira e gases ao redor do núcleo. As imagens foram tiradas a cerca de 4.800 quilômetros do núcleo, em 22 de setembro de 2001. O núcleo tem cerca de 8 quilômetros de ponta a ponta. As regiões mais brilhantes são aquelas iluminadas pela luz solar e o brilho é proporcional ao albedo – razão entre quantidade de luz incidente e luz refletida - do material. O jato de poeira principal, visto estendendo-se em direção ao canto inferior esquerdo, se afasta do cometa em uma direção que fica a cerca de 30 graus da direção do Sol.

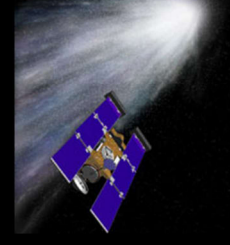
Fonte: <https://www.alamy.com/stock-photo-19pborrelly-comet-borrellys-nucleus-jets-coma-135010552.html>

## Missões cometárias

### O núcleo do cometa 81P/ Wild 2

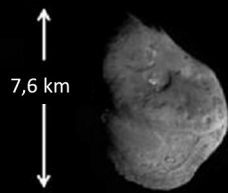


**Stardust**  
(NASA)  
Lançada em 07/02/99;  
Encontro em 02/01/04;  
[coletou material da coma]  
Retorno à Terra em 15/01/06





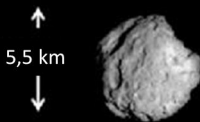
## Dimensões de alguns núcleos



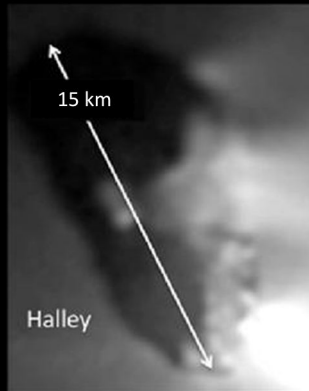
9P/Tempel 1



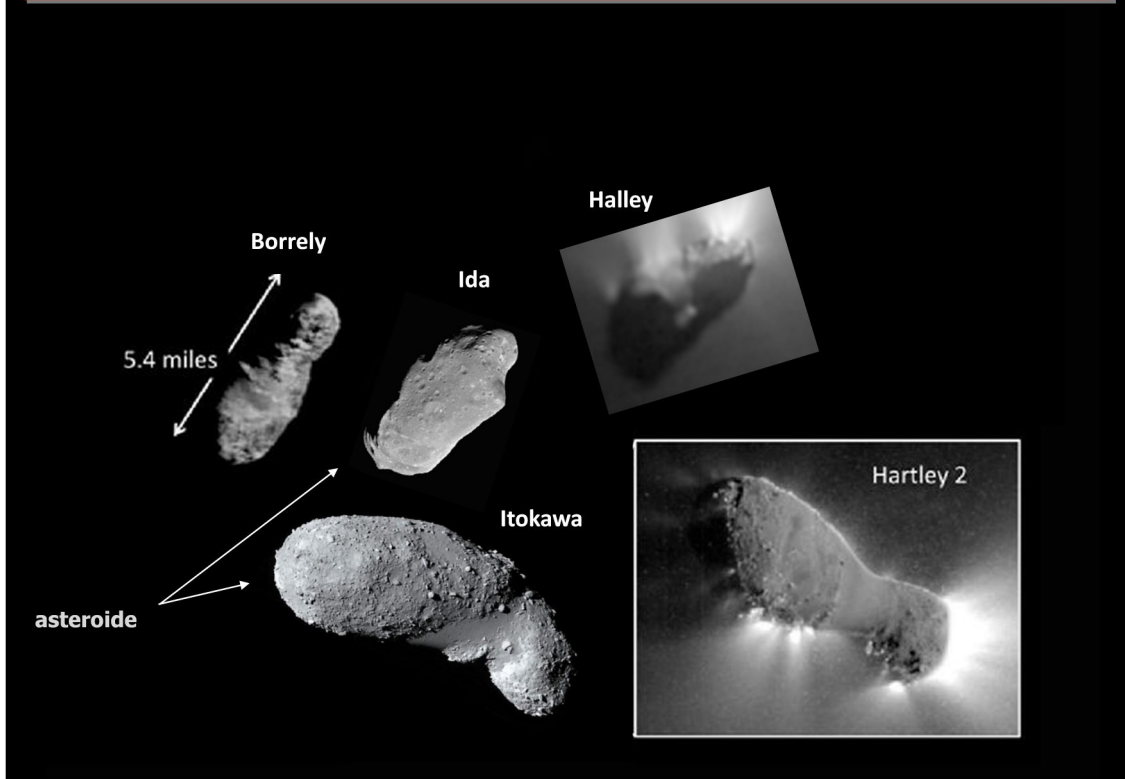
Borrelly



Wild 2



## Semelhanças na forma



Formatos de asteroides e núcleos cometários podem ser semelhantes, como vemos nesta imagem composta. Em particular, os casos do asteroide Itokawa e do cometa Hartley 2, ou mesmo o Churyumov-Gerasimenko: eles parecem ser formados de blocos que se juntaram por atração gravitacional.

## De fato, o que deve ser um cometa?

**Tempel 1**

**Hartley 2**

**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

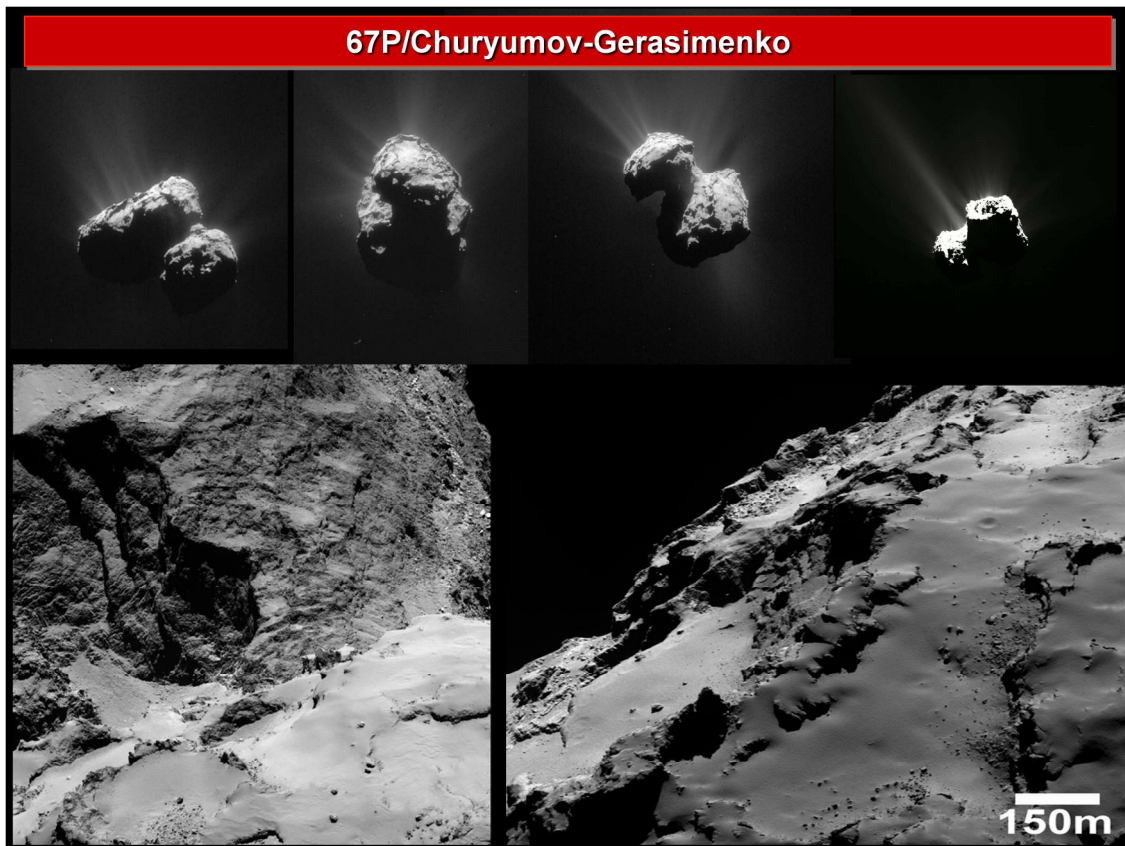
**67P/Churyumov-Gerasimenko**

23/08/2014

06/08/2014

3 km x 5 km;  
Missão Rosetta

Three people standing together, with white arrows pointing to their heads.



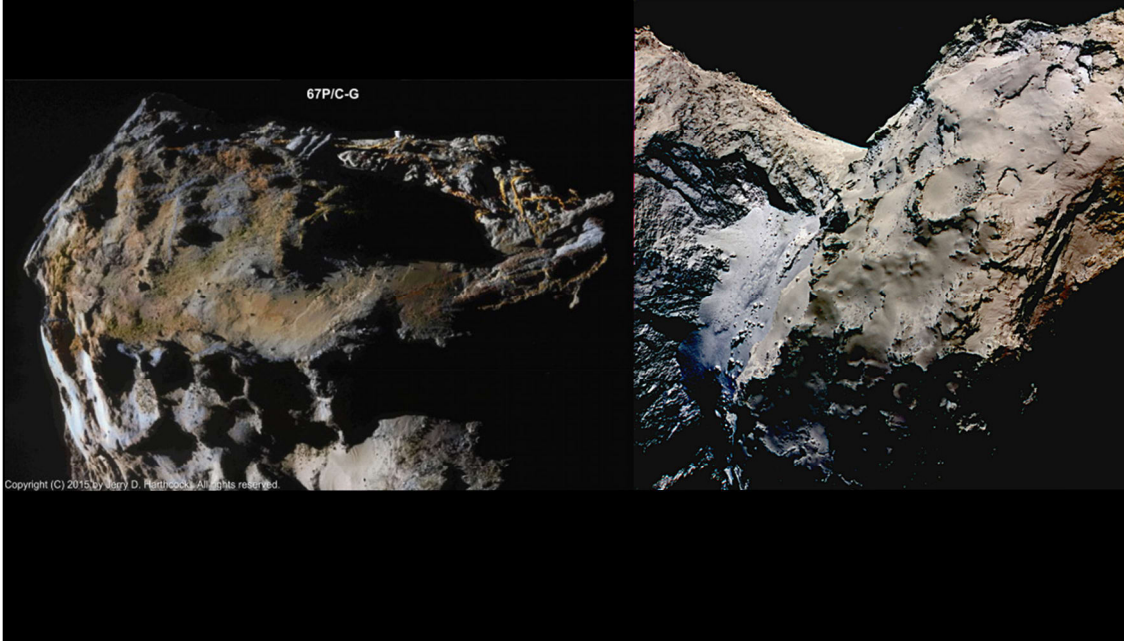
As imagens retornadas da missão Rosetta da Agência Espacial Européia indicam que na época da obtenção das imagens a superfície do cometa 67P / Churyumov-Gerasimenko era um lugar muito ativo - cheio de fraturas crescentes, falésias em colapso e rochas maciças. O material em movimento enterrou algumas características na superfície do cometa enquanto exumava outras. Vê-se um enorme penhasco desabar e uma grande fenda no pescoço do cometa (região entre os dois blocos) ficar cada vez maior. Blocos rochosos do tamanho de um caminhão grande podiam ser movidos pela superfície do cometa a uma distância tão longa quanto um campo e meio de futebol. Um deles, uma enorme rocha de tinha 30 metros de largura e massa de 130 mil toneladas. Essa rocha provavelmente se moveu como resultado de vários eventos de explosão que foram detectados perto de sua posição original.

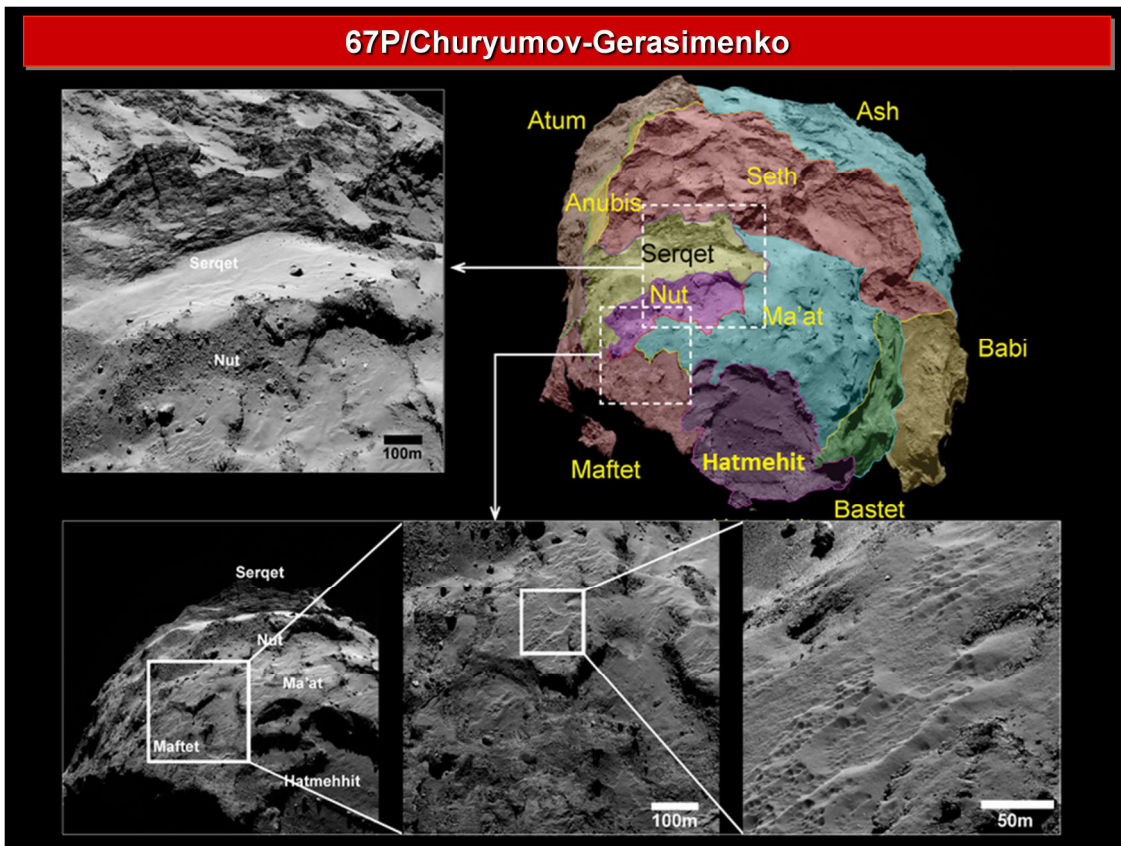
A grande fenda estava no 'pescoço' do cometa - a pequena parte central que conecta os dois lobos" estava se estendendo - indicando que o cometa pode se separar um dia.

Fonte: <https://www.nasa.gov/feature/jpl/the-many-faces-of-rosetta-s-comet-67p>



67P/Churyumov-Gerasimenko





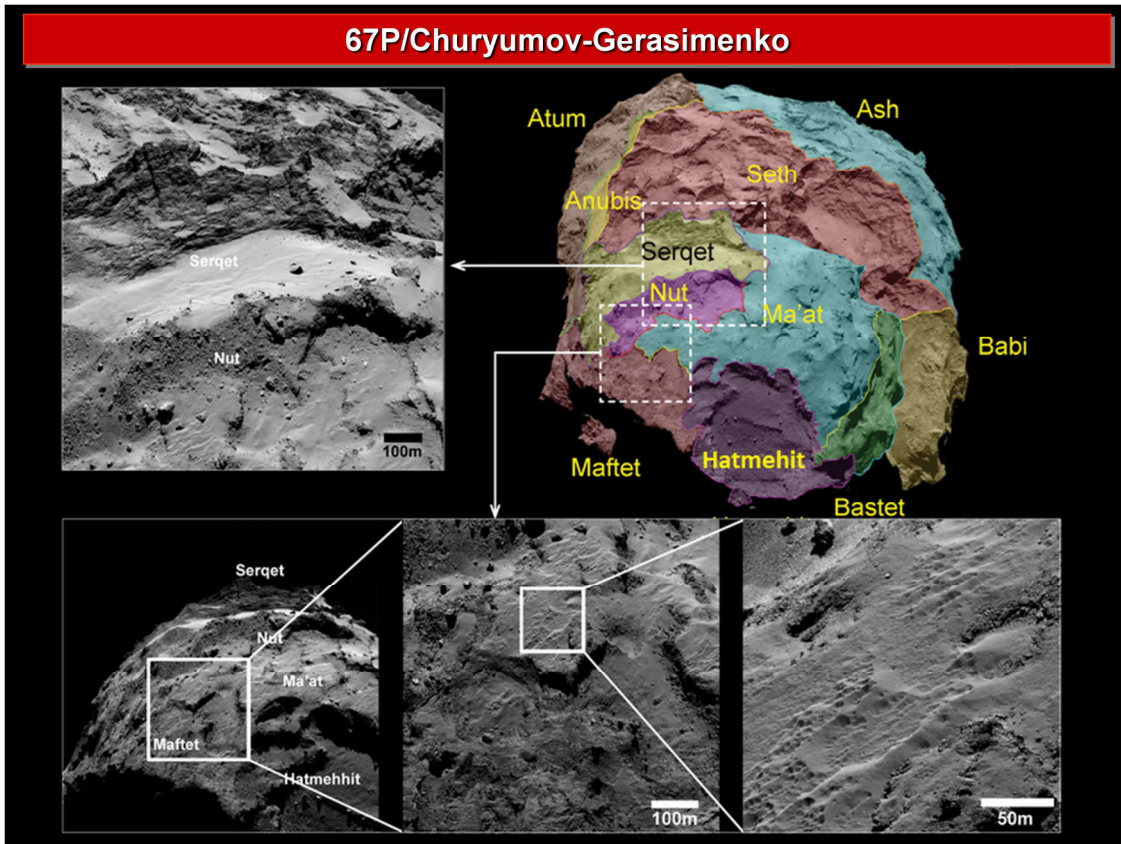
A superfície do cometa 67P/ Churyumov-Gerasimenko pode ser dividida em várias regiões morfologicamente diferentes. Imagens de alta resolução da sonda Rosetta da ESA revelam um mundo único e multifacetado.

A depressão de Nut e Serqet são duas das menores regiões na superfície do cometa em termos de área de superfície, mas ainda mostram uma diversidade morfológica significativa. A região Serqet é definida por uma crista de material consolidado com uma planície adjacente plana, lisa e empoeirada, que forma a borda da Porca. A noz é classificada como uma depressão e é amplamente preenchida com pedras, talvez devido à erosão do Serqet e a um fluxo de poeira semelhante ao observado em Ma'at.

A textura coberta de poeira de Ma'at lembra Ash no corpo do cometa. Também exibe afiados afloramentos de materiais emergentes do pó, que mostram semelhanças com o material mais consolidado de Anuket. Ma'at desce em Maftet, onde a poeira diminui gradualmente em terrenos acidentados, com terraços e fraturados, marcados com depressões rasas de forma irregular. Manchas do material empoeirado ao longo desse limite mostram uma textura sem caroço, que El-Maarry et al sugerem ser um material rico em gelo que pode estar sofrendo dessecação por sublimação. As regiões cobertas de poeira, tanto na cabeça quanto no corpo do cometa, provavelmente estão ligadas à deposição de queda de ar de regiões mais ativas.

Fonte: <https://blogs.esa.int/rosetta/2015/07/15/getting-to-know-rosettas-comet-boundary-conditions/>

## 67P/Churyumov-Gerasimenko



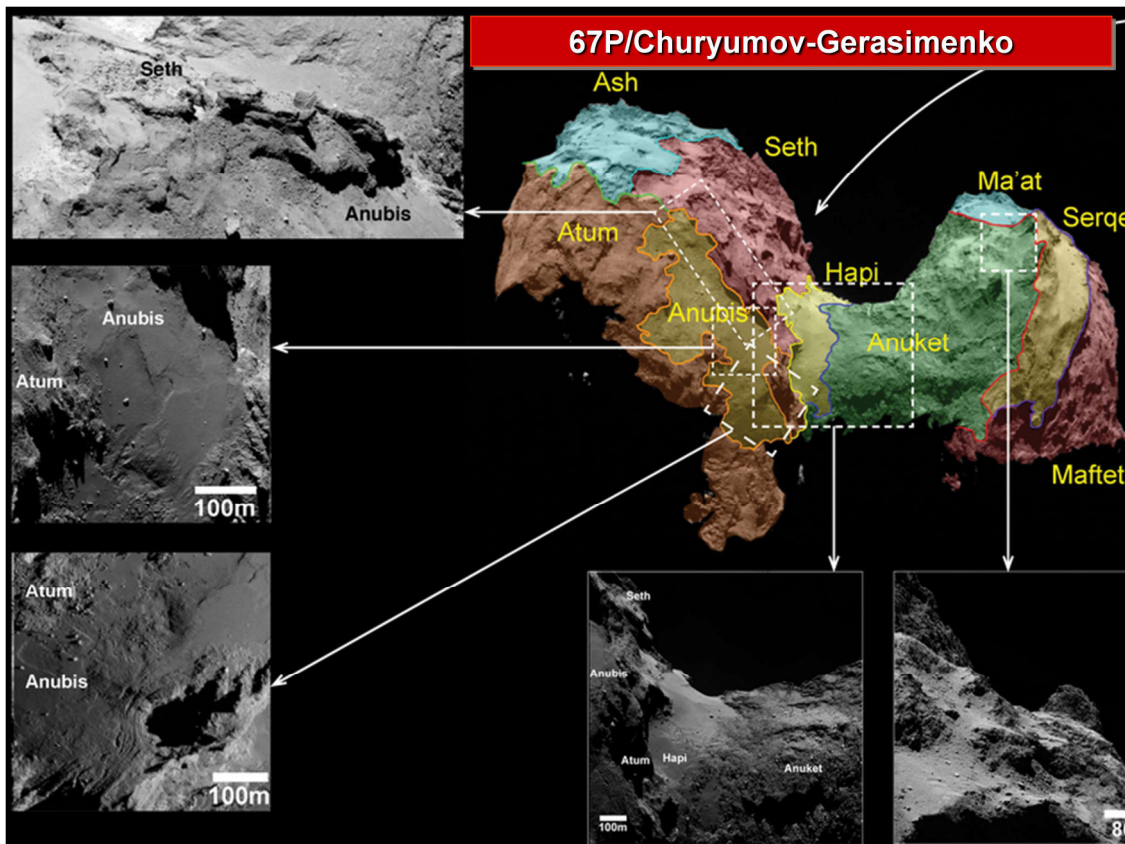
Aton é dominado por uma grande depressão alongada, cercada pelo material frágil e empoeirado de Ash e Babi. Os close-ups mostram entulho e pedras dentro da depressão, a maior das quais atinge até 30m de diâmetro. Os escombros sugerem eventos de queda de rochas, provavelmente a partir da borda da depressão.

Os depósitos suaves nos arredores fazem um contraste marcante e marcam os limites com Babi. No meio (à esquerda), essa cobertura empoeirada pode ser vista sobre regiões de camadas significativas, que podem ser partes de Seth que se estendem abaixo dos depósitos empoeirados de Ash e entram em Babi. Babi hospeda uma estrutura quase circular que lembra Seth que se eleva de 60 a 80 m sobre Khepry, marcando o limite nessa área (veja inserções no canto superior direito e no meio). Cumes bem definidos também separam Babi, mais baixa, de Aker e Seth.

Khepry e Aker têm uma aparência áspera e consolidada, exibem marcações lineares, mas muito poucas pedras. O Aker tem uma textura superficial mais suave que o Khepry, mas ambos contêm manchas muito suaves de 50 a 100 m de diâmetro, localizadas em pontos baixos topográficos. A inserção no canto inferior direito mostra uma visão aproximada de um desses depósitos suaves perto da fronteira Khepry-Aker.

Fonte: <https://blogs.esa.int/rosetta/2015/07/15/getting-to-know-rosettas-comet-boundary-conditions/>





Este conjunto de imagens destaca os limites entre Anubis, Atum e Seth no lobo grande e a transição entre o pescoço e Anuket no lobo pequeno.

Atum é uma região bastante complexa, de textura áspera, com características lineares semelhantes a algumas das estruturas observadas em Imhotep e interpretadas como terraços resultantes da erosão de um terreno em camadas subjacente. Atum faz fronteira com a região de Anubis de textura lisa e quase a encerra, com uma crista bem definida separando-a de Seth.

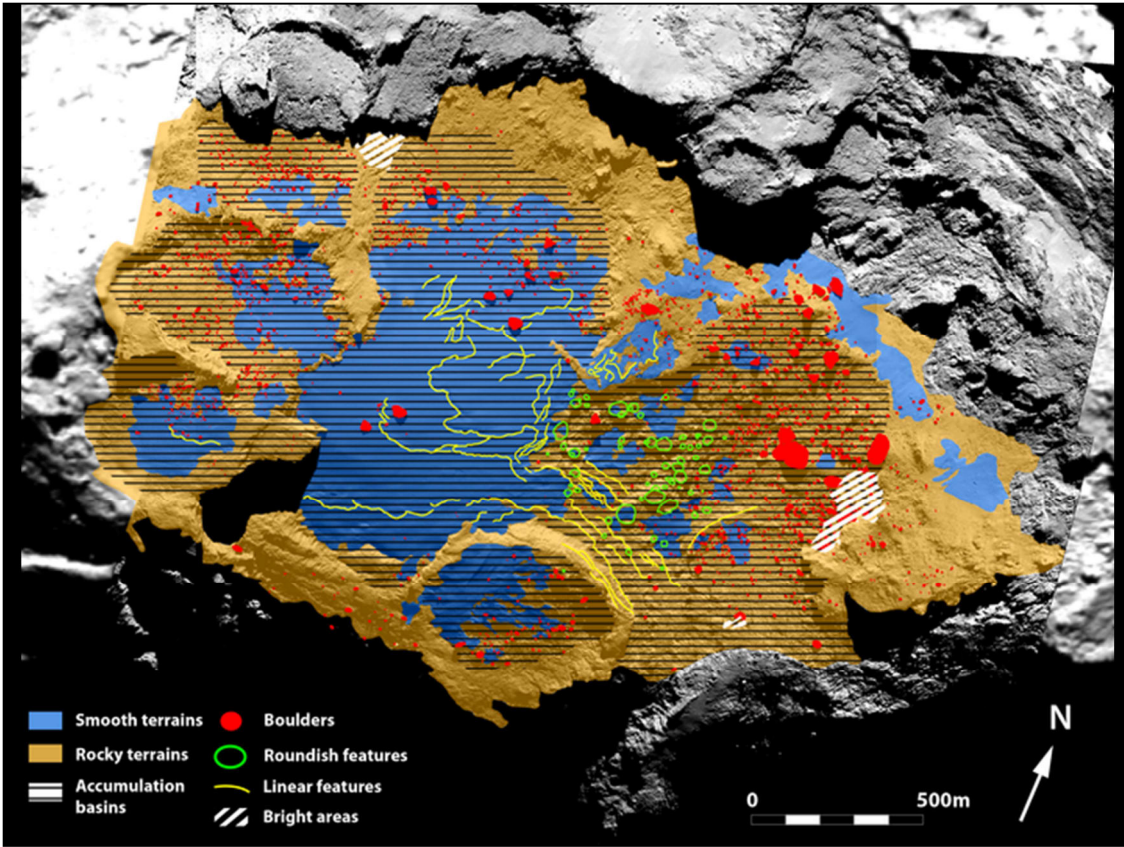
Uma característica notável entre os limites de Anubis e Atum é um conjunto de lineamentos curvos paralelos. Esse recurso pode indicar uma possível dobra da superfície ou a expressão da superfície de terraços enterrados.

Nas proximidades, Atum compartilha um limite com a região de Anuket no lóbulo da cabeça, o último dos quais parece atravessar a região do pescoço em uma área desprovida de depósitos suaves que definem a região de transição de Hapi.

Anuket tem uma superfície áspera com numerosos pedregulhos, mas parece suavizar para fora do pescoço e em direção ao limite com Ma'at coberto de poeira. As regiões mais suaves vistas em Anuket são manchas de poeira, sugerindo que material semelhante ao da superfície de Anuket pode se estender por baixo da região Ma'at coberta de poeira.

Fonte: <https://blogs.esa.int/rosetta/2015/07/15/getting-to-know-rosettas-comet-boundary-conditions/>





## 67P/Churyumov-Gerasimenko

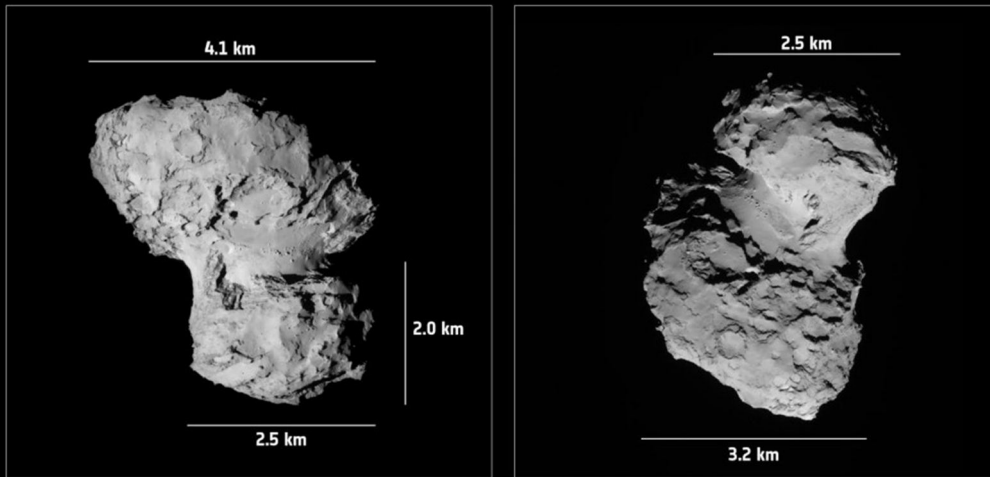


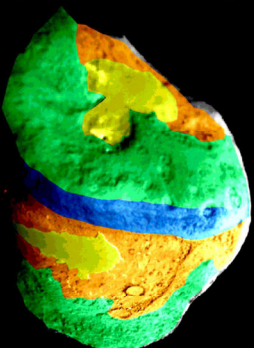
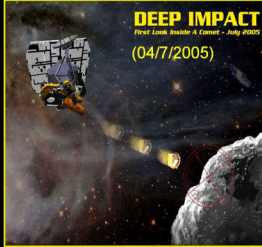
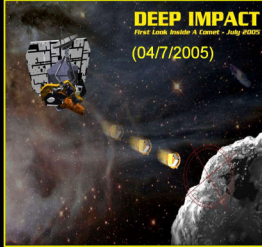
Image: ESA/Rosetta/NAVYCAM. Dimensions: ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA

Dimensão (menor)	2.5 x 2.5 x 2.0 km	Densidade	0.4 g/cm <sup>3</sup>
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 <sup>13</sup> kg	Gases identificados	Água, monóxido e dióxido de carbono, amônia, metano, metanol
Volume	25 km <sup>3</sup>	Grãos (rochosos)	Entre dezenas e centenas de microns


**Missões cometárias**

Camadas finas
Camadas espessas
Terreno plano
Terreno escarpado

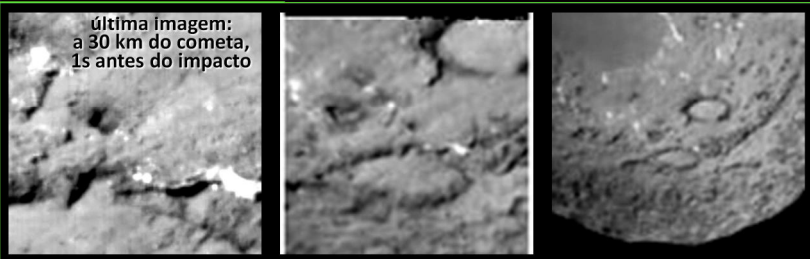
**o núcleo do 9/P Tempel 1**  
[http://deepimpact.umd.edu/flash/di\\_science.html](http://deepimpact.umd.edu/flash/di_science.html)

visão do módulo de voo



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



Foi encontrada uma grande variedade na composição e tamanho das partículas nas amostras do Wild 2. A maioria parece ser uma mistura fracamente construída de grãos muito pequenos com alguns grãos maiores. Além disso, uma grande variedade de minerais de alta e baixa temperatura, de olivina, composições de piroxeno de baixo e alto conteúdo de cálcio e outros. Essa diversidade de minerais de alta e baixa temperatura requer uma ampla gama de condições de formação, provavelmente refletindo diferentes locais de formação. Muitas partículas não se formaram no ambiente frio e nos locais onde os gelados dos cometas se condensaram.

Elas precisavam de altas temperaturas para se formar, além de processos dinâmicos complexos e pouco compreendidos para se saber onde os cometas realmente se formaram. Além disso, partículas de diferentes ambientes devem ter passado por algum processo de acréscimo para acabar como agregados compostos por diferentes minerais.

Uma das principais descobertas da análise das amostras de cometas foi encontrar partículas ricas em matéria orgânica com hidrocarbonetos. A distribuição de tamanho específico encontrada nas amostras do Wild 2 difere da poeira do cometa Halley (a Stardust tem menos partículas refinadas) e da do cometa Grigg-Skjellerup (a Stardust é mais refinada).

Fonte: <https://stardust.jpl.nasa.gov/news/news110.html>

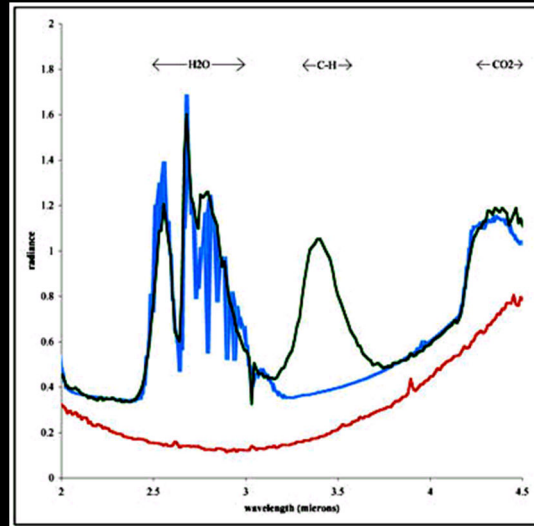
## Espectro infravermelho do vapor

### COMETA TEMPEL 1

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

Azul: modelo considerando água, dióxido de carbono a 1400K e emissão térmica 850K, sem a presença de compostos orgânicos entre 3,3 e 3,6  $\mu\text{m}$ .

Vermelho: espectro apresentado 0,7 s antes do impacto



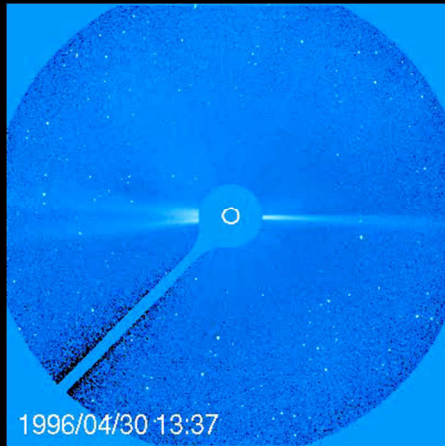


Cometas Hyakutake e NEAT



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

C/1996 B2 (Hyakutake)

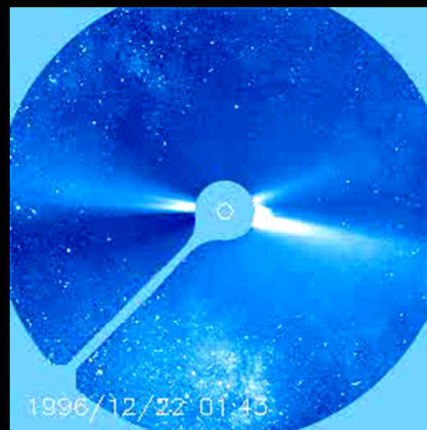
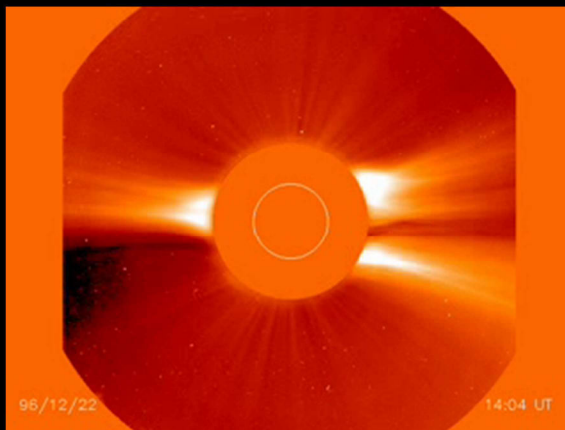


Cometa C/2002 V1 (NEAT)

## Cometas rasantes ou cometas do grupo Kreutz

Os **cometas rasantes Kreutz** são uma família de cometas caracterizados por distâncias periélicas muito curtas. Como passam muito perto do Sol são difíceis de serem vistos. Muitos caem no Sol ou são desintegrados. Acredita-se que sejam fragmentos de um grande cometa que desintegrou-se a vários séculos atrás. O astrônomo alemão Heinrich Kreutz, foi o descobridor desse grupo de cometas.

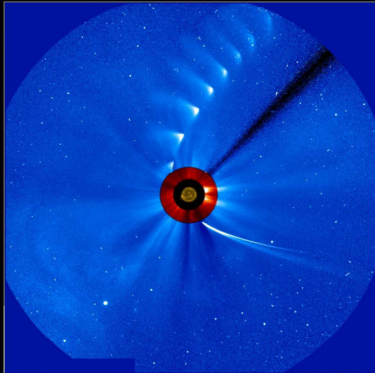
Caso típico é este cometa que surge repentinamente no campo de visão em 22/12/96 e desaparece no Sol em 23/12.



SOHO - NASA/ESA

## 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.



[http://www.nasa.gov/sites/default/files/ison-survives\\_0.gif](http://www.nasa.gov/sites/default/files/ison-survives_0.gif)

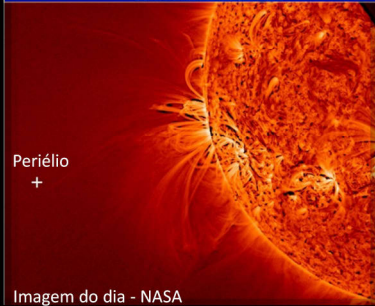


Imagem do dia - NASA

**"Depois da morte, a ressurreição do Ison!"**  
*Folha de São Paulo, 29/11/13 00:56*

## Cometas rasantes

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



## Fragmentação: cometa 73P (Schwassmann-Wachmann 3)

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

- Observação sugere que fragmentos são arastados 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.



NASA, ESA, H. Weaver (JHU/APL), M. Jäger and G. Rhemann

STScI-PRC06-18



## Longevidade dos cometas

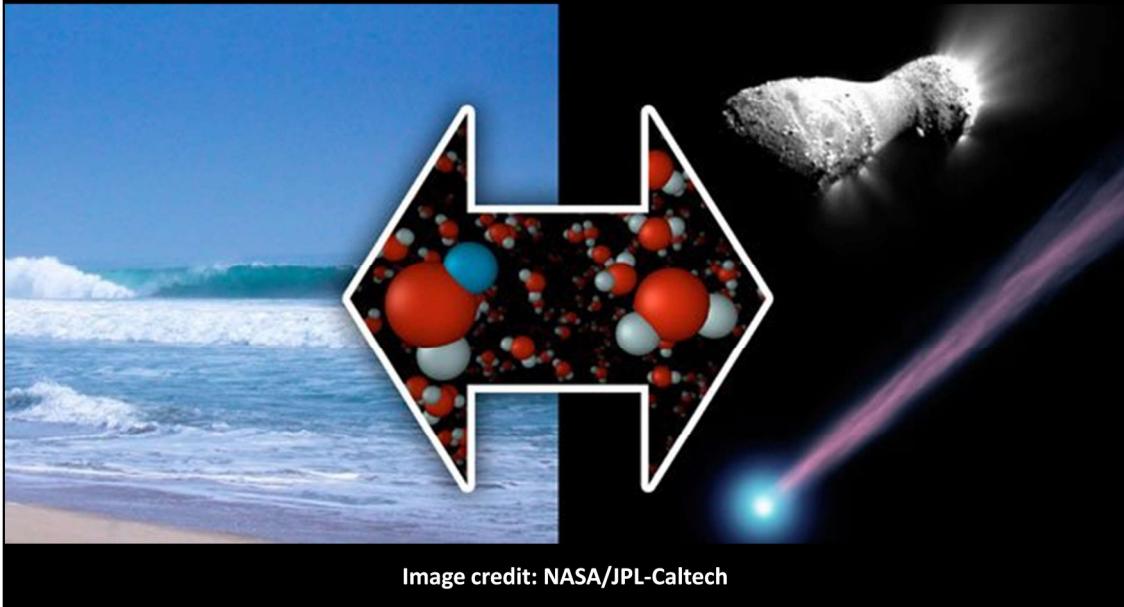
- Com exceção dos cometas de curto período, as órbitas dos cometas são altamente excêntricas, portanto os afélios estão muito distantes do Sol.
- Pela 2a. Lei de Kepler, as velocidades nos afélios são mínimas.

• **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).

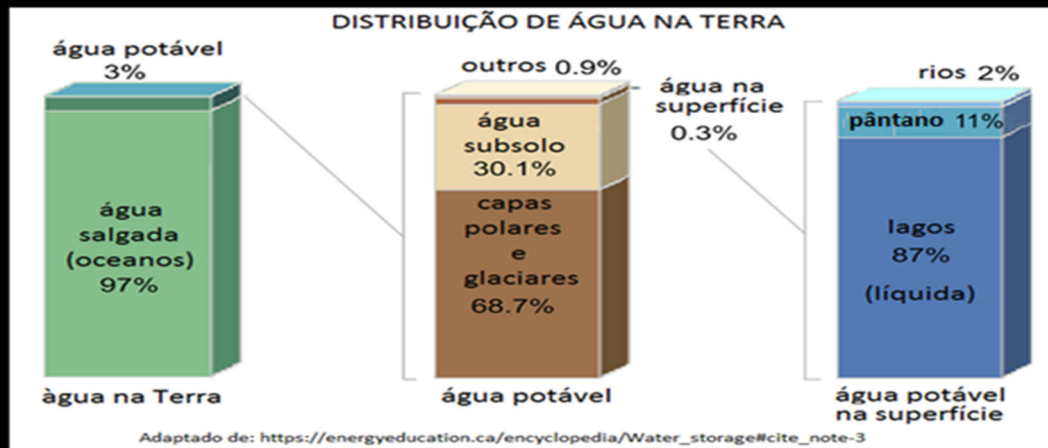
Gravitação e Forças de Maré podem diminuir a vida de um cometa: forças de maré, decorrentes da aproximação com corpos de grande massa, provocam a fragmentação do núcleo, e a morte prematura do cometa.

## Origem da água na Terra

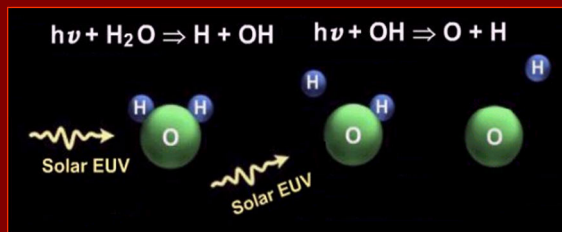


No início de formação dos planetas, a Terra já formada era muito quente por conta dos processos de acreção de matéria (através de quedas de corpos e colisões violentas) e de vulcanismo intenso. Portanto, nessa época não havia ambiente propício para a existência de água nos três estados conhecidos (sólido, líquido e gasoso). Então, como a água surgiu? Poderia ser a água trazida de fora por exemplo por cometas que aqui caíram ou por asteroides que, como vimos, podem ter água? Uma maneira de se verificar isso é estudando o que nós chamamos de água, ou seja, os tipos possíveis de moléculas de água.

## Água na Terra e perda



### Fotodissociação da água:



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

### Distribuição da Água da Terra

A distribuição de água na superfície da Terra é extremamente desigual. Apenas 3% da água na superfície é fresca; os 97% restantes residem no oceano. De água doce, 69% reside em geleiras, 30% subterrâneo e menos de 1% está localizado em lagos, rios e pântanos. Visto de outra maneira, apenas um por cento da água na superfície da Terra é utilizável pelos seres humanos e 99% da quantidade utilizável está situada no subsolo.

Fonte: <https://www.e-education.psu.edu/earth103/node/701>

## Razão Deutério / Hidrogênio

**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 <sub>2</sub> O	1.558 ± 0.001	33
103P/Hartley 2	H <sub>2</sub> O	1.61 ± 0.24	this work
1P/Halley	H <sub>2</sub> O	3.06 ± 0.34	34
C/1996 B2 (Hyakutake)	H <sub>2</sub> O	2.90 ± 1.00	35
C/1995 O1 (Hale-Bopp)	H <sub>2</sub> O	3.3 ± 0.8	36
153P/Ikeya-Zhang	H <sub>2</sub> O	< 2.50	37
C/2002 T7 (LINEAR)	H <sub>2</sub> O	2.5 ± 0.7	38
8P/Tuttle	H <sub>2</sub> O	4.09 ± 1.45	39
Enceladus	H <sub>2</sub> O	2.5 <sup>+1.5</sup> <sub>-0.7</sub>	40
CI chondrites	H <sub>2</sub> O	1.70 ± 0.10	41
Protosolar	H <sub>2</sub>	0.21 ± 0.04	15
Interstellar medium	H	0.16 ± 0.01	15
Jupiter	H <sub>2</sub>	0.225 ± 0.035	42
Saturn	H <sub>2</sub>	0.17 <sup>+0.075</sup> <sub>-0.045</sub>	42
Uranus	H <sub>2</sub>	0.55 <sup>+0.35</sup> <sub>-0.15</sub>	43
Neptune	H <sub>2</sub>	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.

A fórmula da molécula mais comum (H<sub>2</sub>O) é formada de 2 átomos de hidrogênio e 1 átomo de oxigênio. No caso, o oxigênio 16 (<sup>16</sup>O). Mas também é possível formar água com 1 átomo de hidrogênio e 1 átomo de deutério (<sup>2</sup>H ou D), que é um isótopo do hidrogênio com o dobro da massa. Então é possível formar a água com 1 átomo de hidrogênio, 1 de deutério e 1 de oxigênio (HDO). Mas também é possível formar moléculas de água com 2 átomos de deutério e 1 de oxigênio (D<sub>2</sub>O). Todas essas possibilidades também podem ser feitas com o isótopo <sup>18</sup>O (mais pesado que o <sup>16</sup>O). Portanto, há uma variedade de tipos de molécula de água. O tipo mais comum é o que conhecemos são dois átomos de hidrogênio para um átomo de oxigênio 16 (<sup>1</sup>H<sub>2</sub><sup>16</sup>O).

É possível diferenciar o tipo H<sub>2</sub>O do tipo HDO, encontrando a razão entre deutério hidrogênio que é conhecido como taxa deutério e hidrogênio (D/H), mais precisamente no oceano que contém a maior parte de água da Terra. A taxa D/H é cerca de

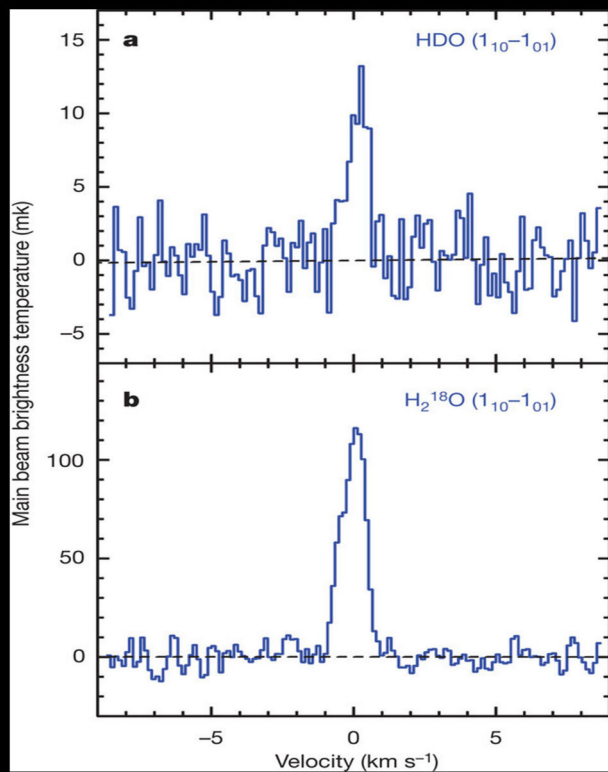
1,558x10<sup>-4</sup>, ou 1 átomo de deutério para cada 6.418 átomos de hidrogênio.

A tabela acima mostra as taxas D/H para a Terra e vários outros objetos. As taxas para a Terra são parecidas apenas com a dos cometa 103P/ Hartley 2 e meteoritos do tipo condritos carbonáceos (ricos em carbono).

## 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



Através do espectro, podemos diferenciar os dois tipos mais comuns de água. A figura acima mostra os espectros dos tipos de molécula de água H<sub>2</sub>O e HDO observadas no cometa 103P/ Hartley 2, que pertence à família de cometas de Júpiter (cometas com afélios próximos à órbita do planeta).

Como a quantidade de água HDO é relativamente pequena, é difícil observar seu espectro, por isso é preciso que o corpo seja muito grande, contenha muita água, ou o cometa seja muito brilhante.