

11. Cometas e Visitantes Interestelares



AGA0502, Planetas e Sistemas Planetários

Prof. Jorge Meléndez, IAG-USP

Asteroides são principalmente rochosos-gelados, pois a origem é dentro (ou próxima) da linha de gelo. Já os cometas são gelados, pois se formaram além da linha de gelo.

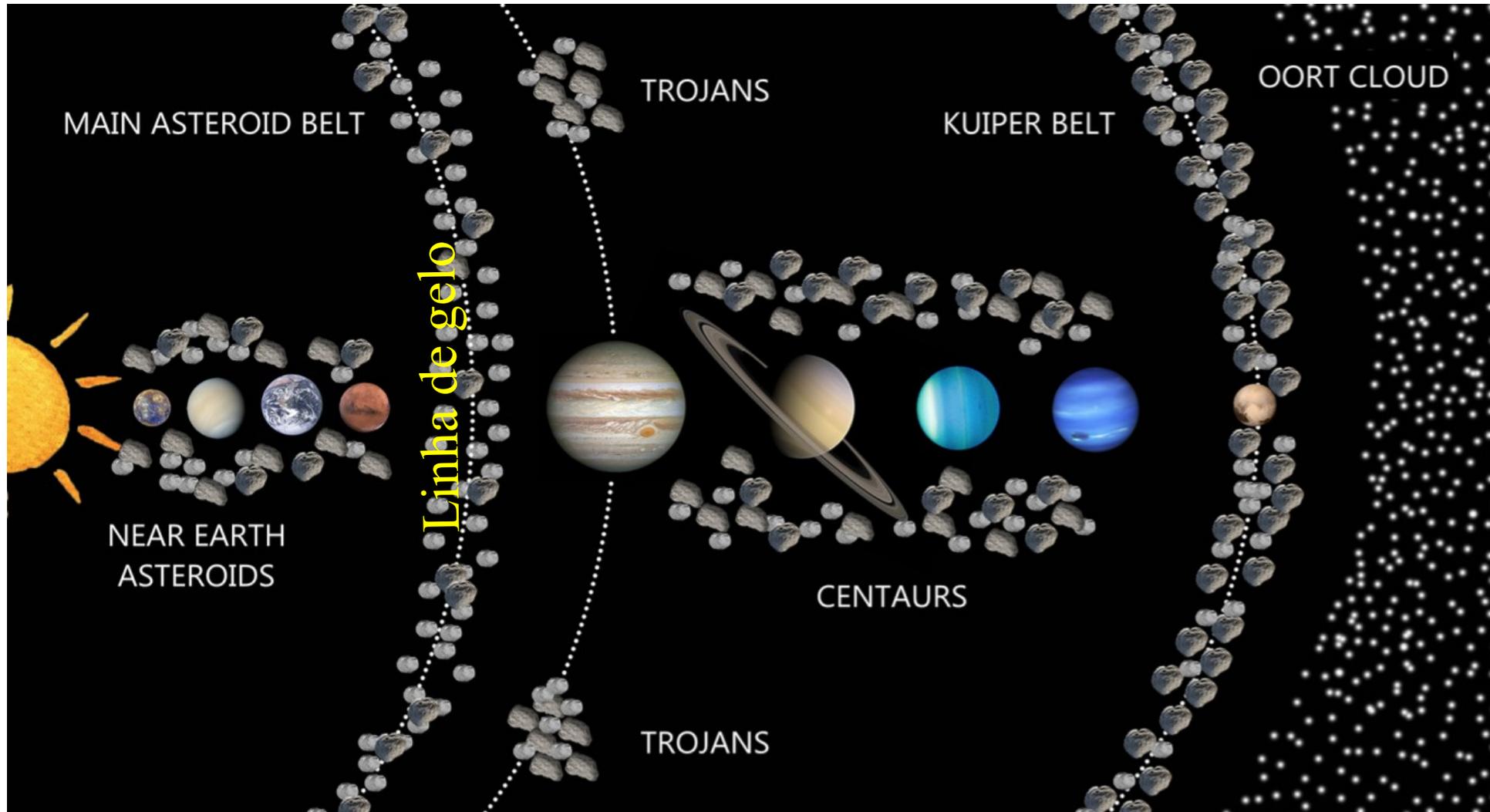


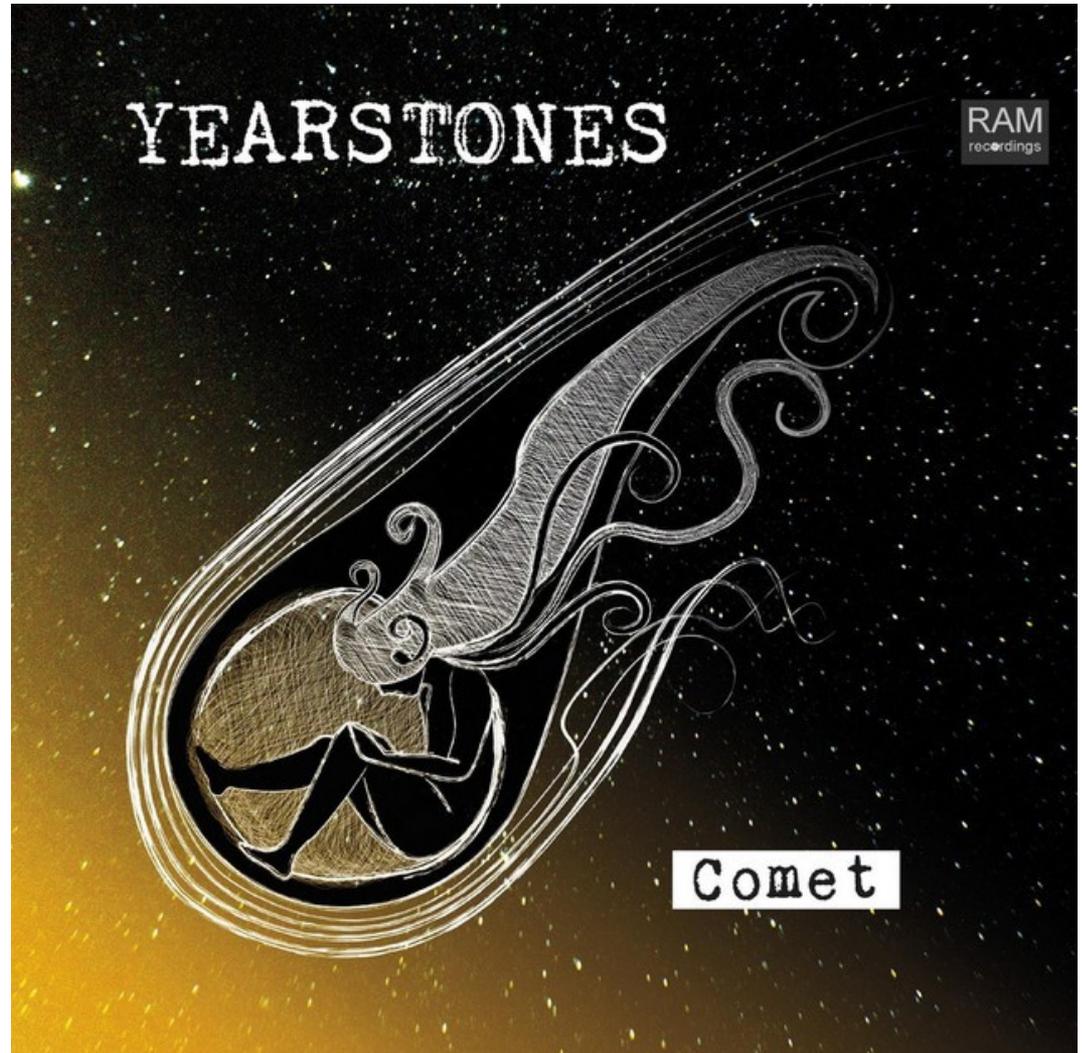
Figure 1.1: Schematic view of the Solar System. Image created by K. Frantseva.

Etimologia ✨

Cometa

Latim comēta ou
comētēs

Grego κομήτης :
'estrela' de cabelo
comprido



Designação dos cometas

Prefixo para indicar o tipo de cometa:

P/ para cometa periódico. Exemplo: P/1996 A1

C/ para cometa não periódico. Exemplo: C/1995 Q2

X/ para cometa ainda sem órbita calculada

D/ para um cometa extinto ou desaparecido

I/ para objetos interestelares (cometas ou asteroides)

Exemplo: I/2017 U1

Após o prefixo, é indicado:

- o ano da descoberta
- letra maiúscula com a quinzena de observação: 24 possíveis letras, de A a H e de J a Y (I e Z são excluídas)
- número com a ordem de descoberta na quinzena

Exemplo: P/1996 A1

Cometa periódico descoberto no ano 1996. A = 1^a quinzena.
Primeiro cometa descoberto nessa quinzena

Exemplo: C/1995 D2

Cometa não periódico descoberto no ano 1995. D = 4^a quinzena. Segundo cometa descoberto nessa quinzena

Entre parênteses é incluído o nome de até 3 descobridores, projeto ou instrumento

Exemplo: P/1996 A1 (Jedicke)

P/1996: cometa periódico descoberto no ano de 1996

A1: 1ª quinzena de 1996 e o 1º descoberto nessa quinzena

Jedicke: foi descoberto pelo astrônomo Robert Jedicke

Entre parênteses é incluído o nome de até 3 descobridores, projeto ou instrumento

Exemplo: P/1996 A1 (Jedicke)

P/1996: cometa periódico descoberto no ano de 1996

A1: 1ª quinzena de 1996 e o 1º descoberto nessa quinzena

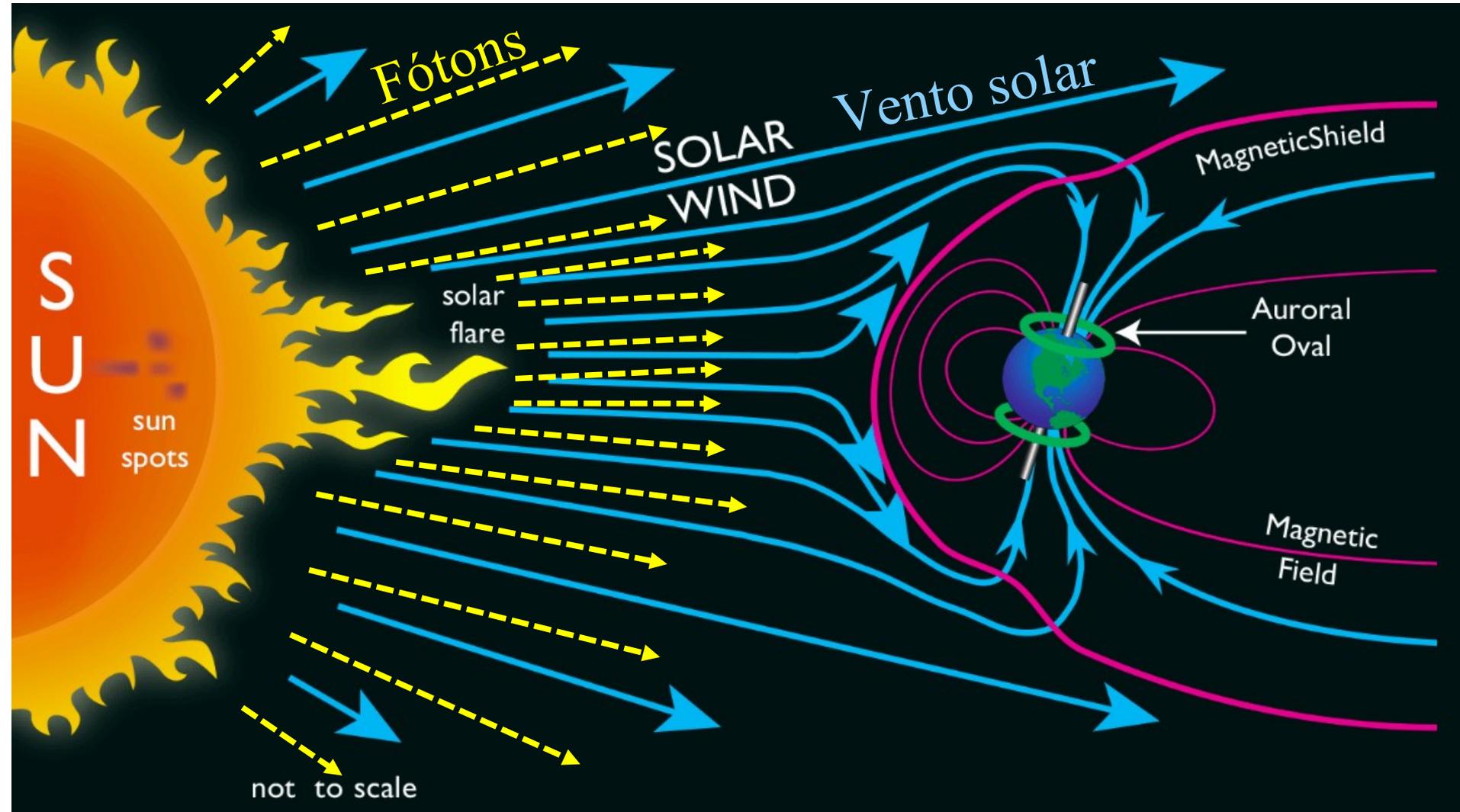
Jedicke: foi descoberto pelo astrônomo Robert Jedicke

Após a 2ª passagem observada no periélio, os cometas periódicos recebem um prefixo com a ordem da descoberta

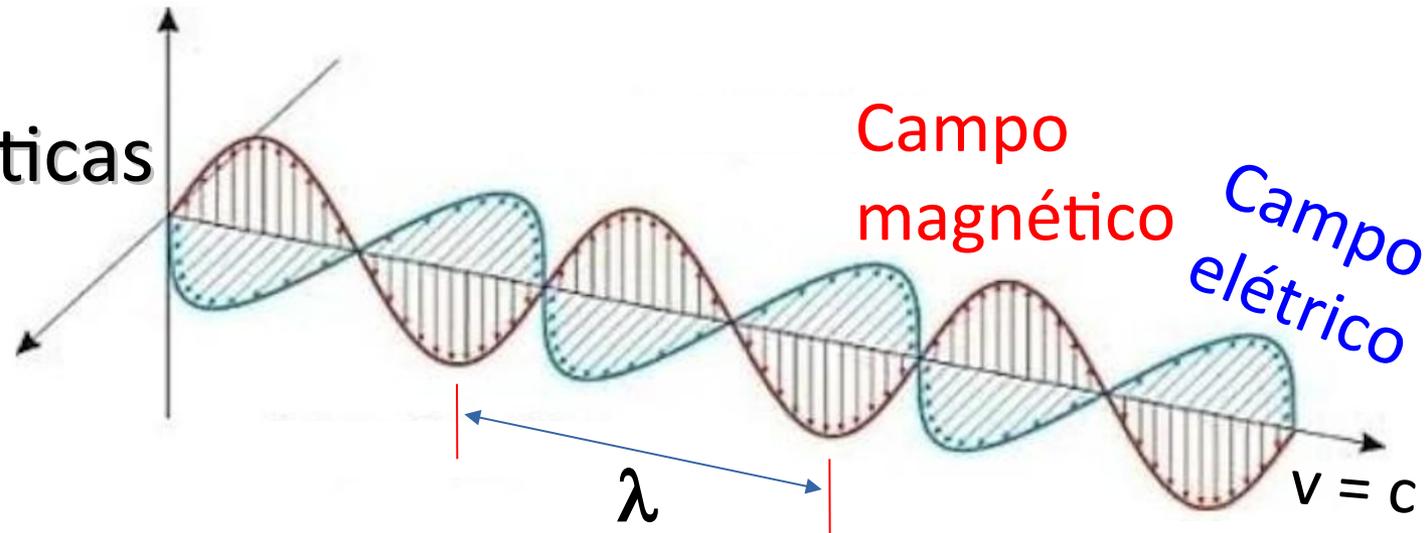
Ex.: cometa Halley foi o 1º cometa periódico → 1P/Halley

Ex.: cometa P/1996 A1 (Jedicke) → **269 P/Jedicke**

Ao se aproximar do Sol, o cometa desenvolve caudas. O Sol emite fótons (radiação eletromagnética) e vento solar (partículas carregadas: prótons, elétrons e núcleos de hélio)



As ondas eletromagnéticas carregam energia e **momento**



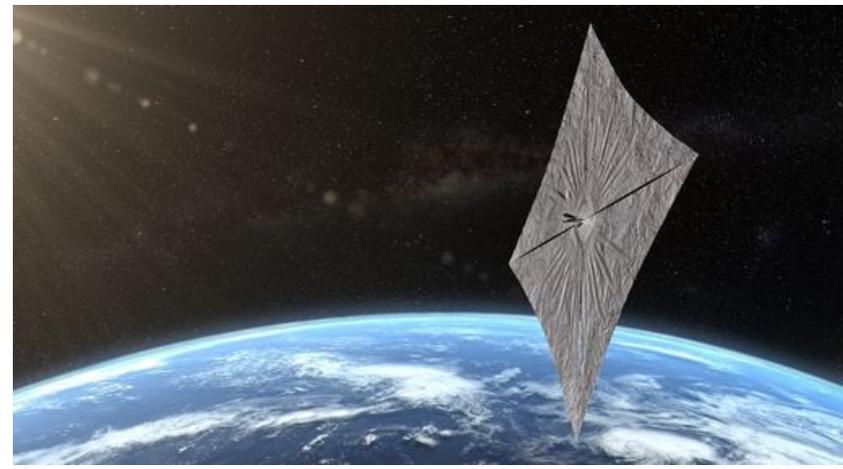
Os campos **elétrico** e **magnético** vibram em planos perpendiculares à direção de propagação da onda, que se move através do espaço à velocidade da luz. Os fótons carregam energia e momento.

Relatividade: $E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$

Fótons não têm massa: $\rightarrow p = E/c$

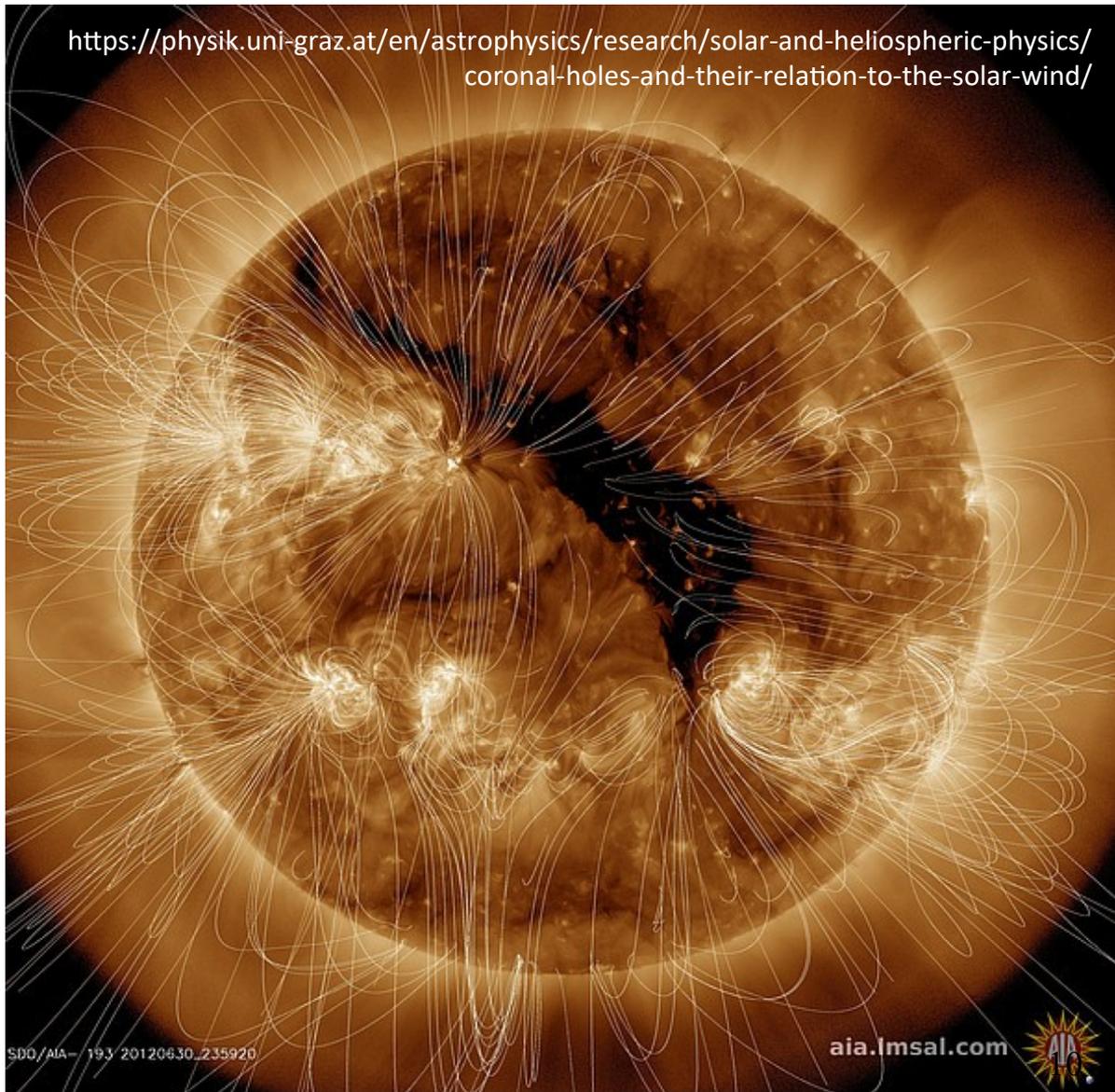
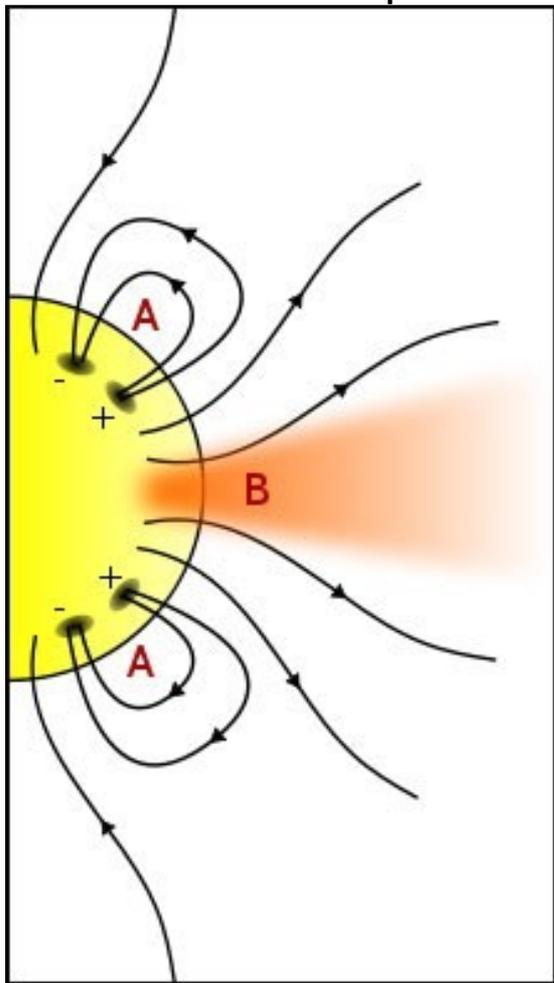
Momento da luz \rightarrow pressão de radiação

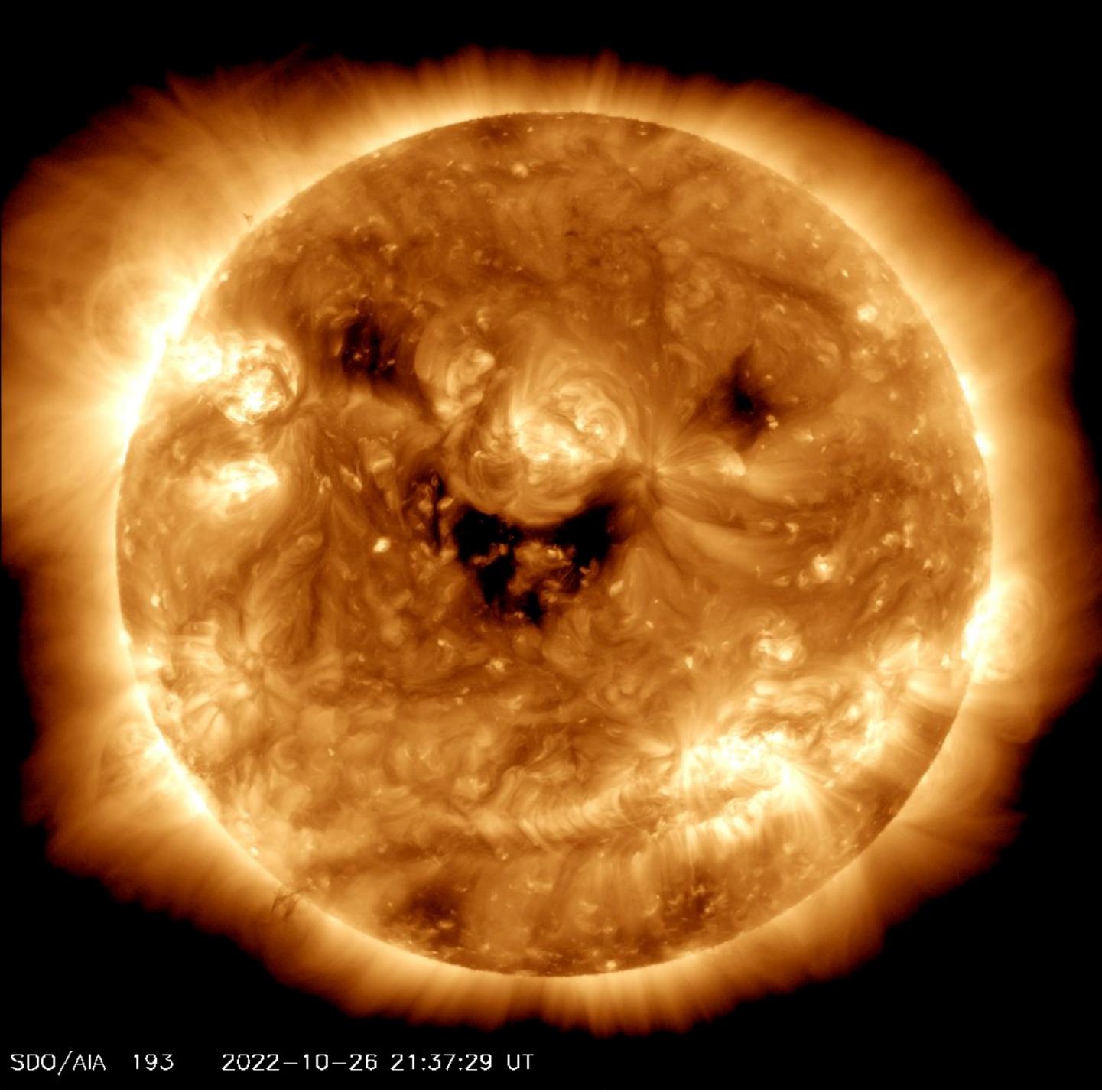
Vela solar LightSail 2



O Sol lança continuamente matéria para o espaço. Esse vento solar tem uma velocidade global de ~ 400 km/s, e quando se desprende de um buraco coronal viaja muito mais rápido, com até ~ 800 km/s.

Essas regiões têm linhas de campo abertas, permitindo um fluxo mais rápido do vento solar.





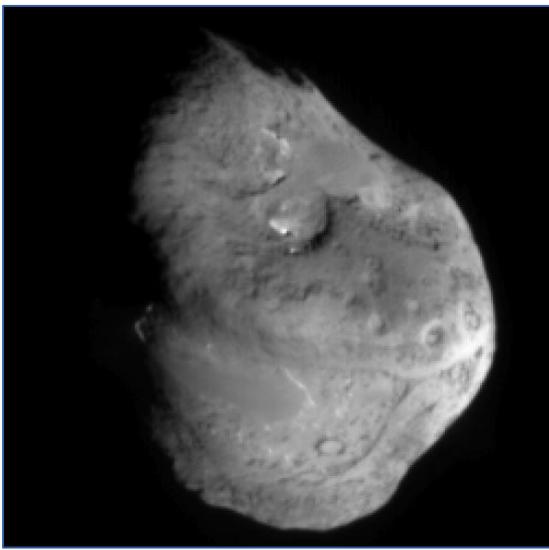
O Sol "sorrindo",
capturado pela
NASA em
radiação
ultravioleta
extremo (193 \AA
 $= 19,3 \text{ nm}$) em
26/10/2022

As regiões
escuras são
"buracos
coronais", onde
o vento solar é
mais intenso.

Núcleo de cometa longe do Sol

Cometa Tempel 1 (8x5 km), Deep Impact / NASA

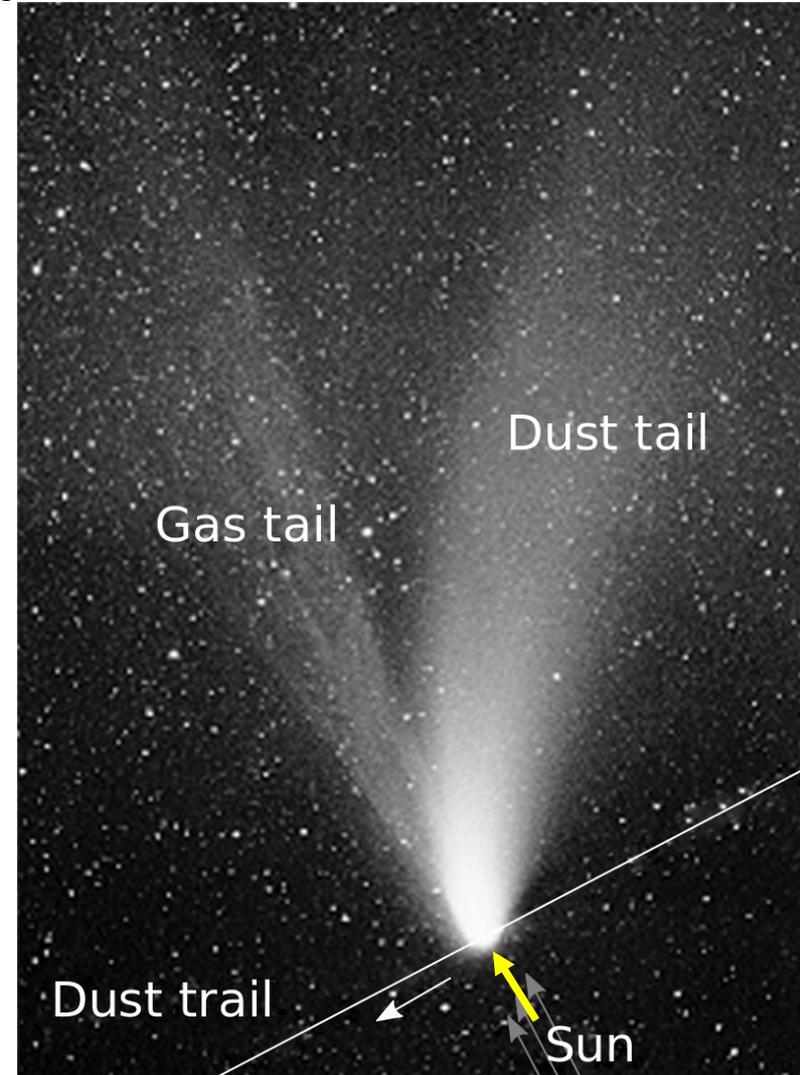
<https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA02127>



Ao se aproximar ao Sol, temos a formação de 2 caudas

A cauda de poeira, pela pressão de radiação

A cauda de íons (gás ou plasma), pela interação do vento solar com partículas do cometa ionizadas pela luz UV do Sol



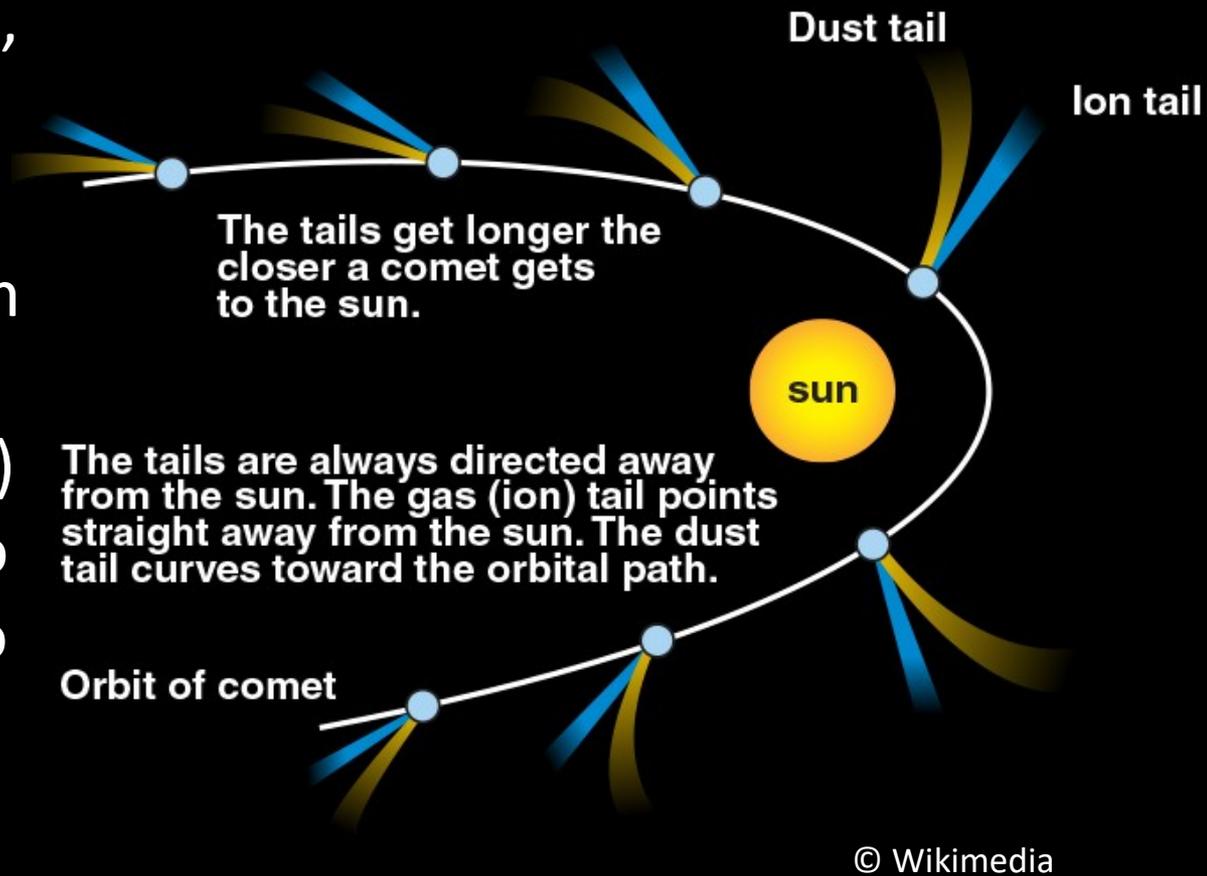
A cauda de íons é estreita e retilínea, a de poeira é larga e encurvada



Cometa
C/2020 F3
#Neowise
(c) Takao
Sambommatsu,
23/Jul/2020

Ao se aproximar ao Sol, a radiação solar aquece o núcleo do cometa, liberando partículas e gases, que são levados para longe pelo vento solar (**cauda de íons**) e a pressão de radiação (**poeira**)

O gás é ionizado (p.ex., CO^+ , N_2^+ , CO_2^+) pela radiação UV do Sol. A interação dos íons com o vento solar causa a cauda de plasma (íons) apontando em direção oposta ao Sol. O brilho é pela recombinação dos íons. Exemplo:
 $\text{CO}^+ + e^- = \text{CO} + \text{fóton}$



A poeira é empurrada pela pressão de radiação, mas a baixas velocidades, criando uma cauda de poeira curvada na direção da órbita. Essa cauda brilha porque reflete a luz do Sol.

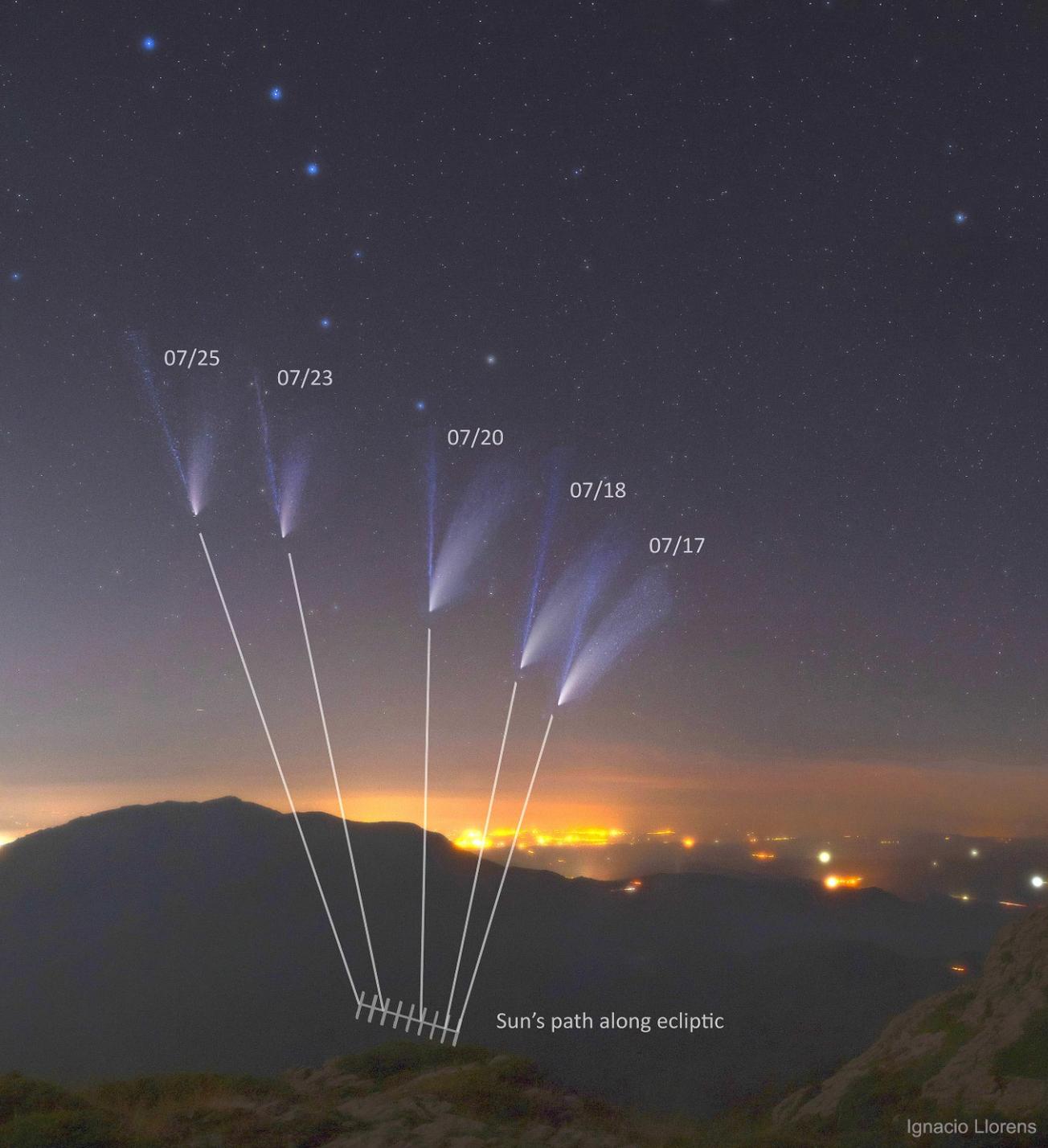
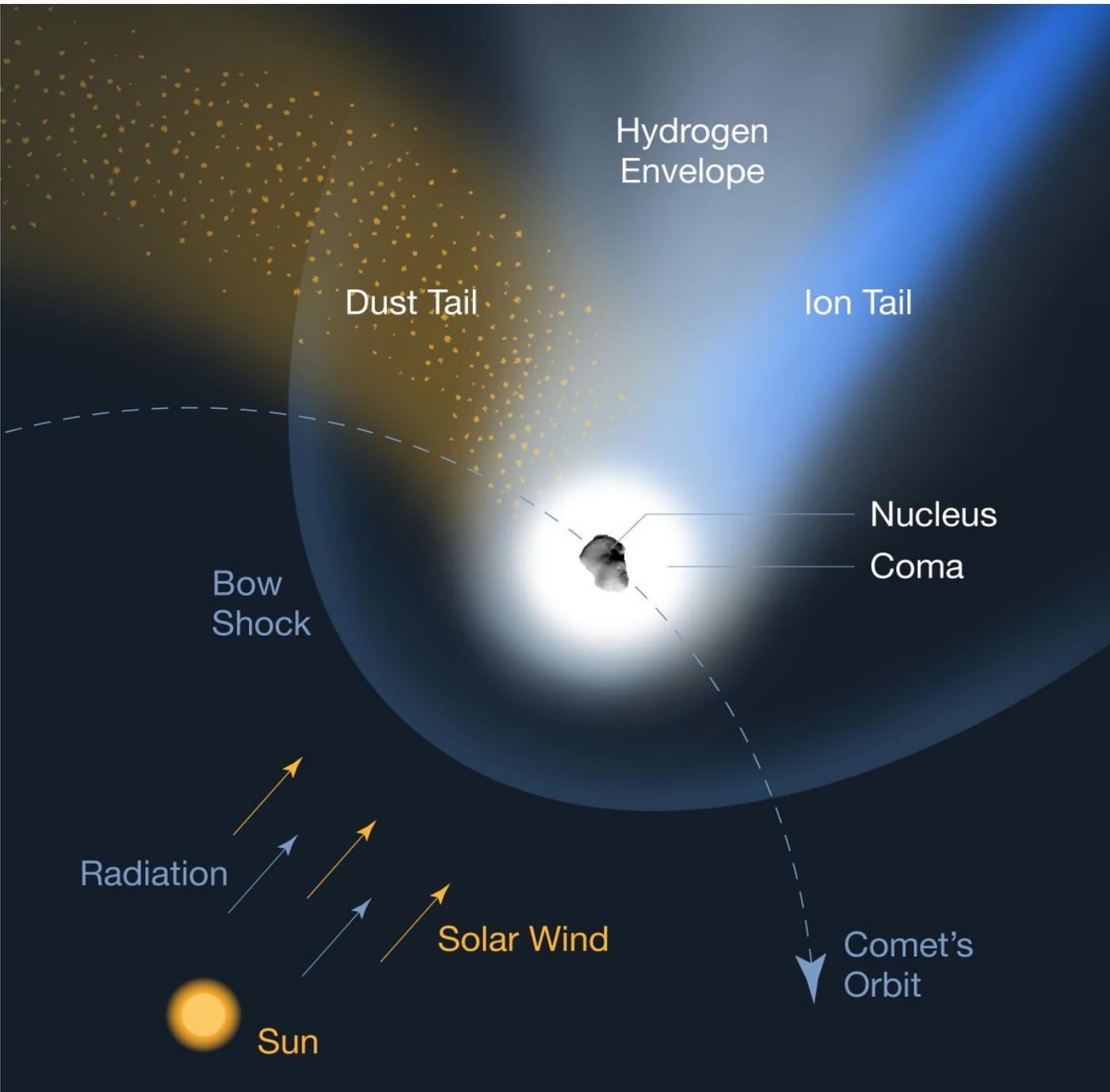


Imagem
composta do
cometa C/2020 F3
#Neowise
(c) Ignacio Llorens
17-25/Jul/2020

As caudas do
cometa Neowise,
apontando em
direção oposta ao
Sol

Partes do cometa:

- Núcleo ~5 km
- Coma ~10⁶ km
- Caudas ~10⁸ km de íons e poeira
- Envoltório de hidrogênio ~10⁷ km
- Arco de choque (interação do vento solar e a ionosfera cometária)



O cometa (Pedro) Bernardinelli-Bernstein, anunciado em 6/2019, é o maior descoberto até agora (~150km). 2014: 29 UA, 2021: 20 UA, Jan/2031 (periélio): 10,9 UA

SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA
@sbfisica

nos confins gelados do Sistema Solar

Física ao Vivo - Hoje - 17/11 - 19h

Hoje é a vez de Pedro Bernardinelli, da Universidade de Washington, falar sobre "Cometas gigantes e mundos pequenos nos confins gelados do Sistema Solar".

Diâmetro estimado: 150km

Bernardinelli-Bernstein
(C/2014 UN271)

C/2014 UN271 (Bernardinelli-Bernstein)
LOOK Project / Las Cumbres Observatory

250,000 km

2021 Jun 22.17

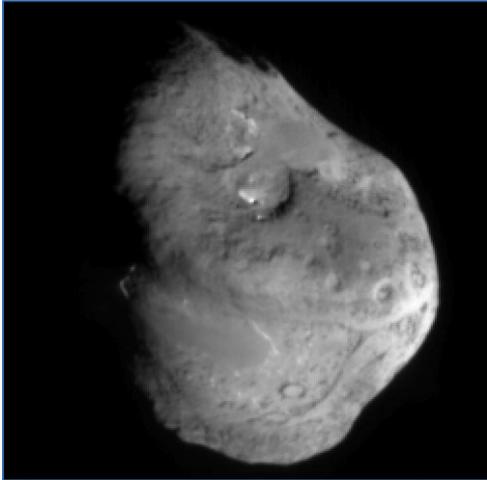
Acima: imagem pontual do núcleo
Abaixo: imagem recente mostrando a coma do cometa

Assistir mais tarde Compartilhar

Pedro Henriqu...

Núcleo: tipicamente ~1 a 10 km.

Tamanhos de ~0,1 km a ~100 km, mas raramente acima de 10 km

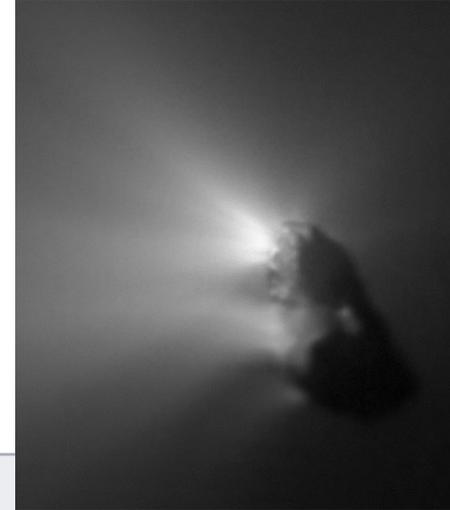


Cometa Tempel 1,
8x5 km.
Deep Impact, NASA

<https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA02127>

Cometa Halley,
8x 15 km
ESA

14/3/1986



Baixa densidade

| Nome | Dimensões (km) | Densidade (g/cm ³) | Massa (kg) ^[40] |
|---------------------------|-----------------|--------------------------------|----------------------------|
| Cometa Halley | 15 × 8 × 8 | 0.6 | 3×10 ¹⁴ |
| 9P/Tempel 1 | 7.6 × 4.9 | 0.62 | 7.9×10 ¹³ |
| 19P/Borrelly | 8 × 4 × 4 | 0.3 | 2.0×10 ¹³ |
| 81P/Wild | 5.5 × 4.0 × 3.3 | 0.6 | 2.3×10 ¹³ |
| 67P/Churyumov-Gerasimenko | 4.1 × 3.3 × 1.8 | 0.47 | 1.0×10 ¹³ |



Cometa
103 P/Hartley,
0,7x 2,3 km
EPOXI / NASA

103 P/Hartley 0,7x2,3 km 0,2 - 0,4 3x10¹¹

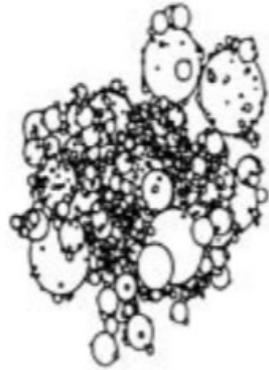
A densidade do núcleo dos cometas ($0,3 - 0,6 \text{ g/cm}^3$) é menor que a densidade de gelo de água ($0,92 \text{ g/cm}^3$) na superfície da Terra.

→ o núcleo não é um bloco de gelo sujo (a), mas uma agregação “fofa” de pequenos grãos (b).

a)



b)



Núcleo do cometa
67P/Churyumov–
Gerasimenko
observado em
19/9/2014 pela missão
europeia Rosetta.

Devido à fragilidade dos núcleos cometários, os cometas se fragmentam facilmente quando se aproximam do Sol ou de Júpiter, como o cometa Shoemaker-Levy 9, que possivelmente se fragmentou ao passar perto de Júpiter (40000 km acima das nuvens de Júpiter) no 7/jul/1992

https://en.wikipedia.org/wiki/Comet_Shoemaker%E2%80%9393Levy_9



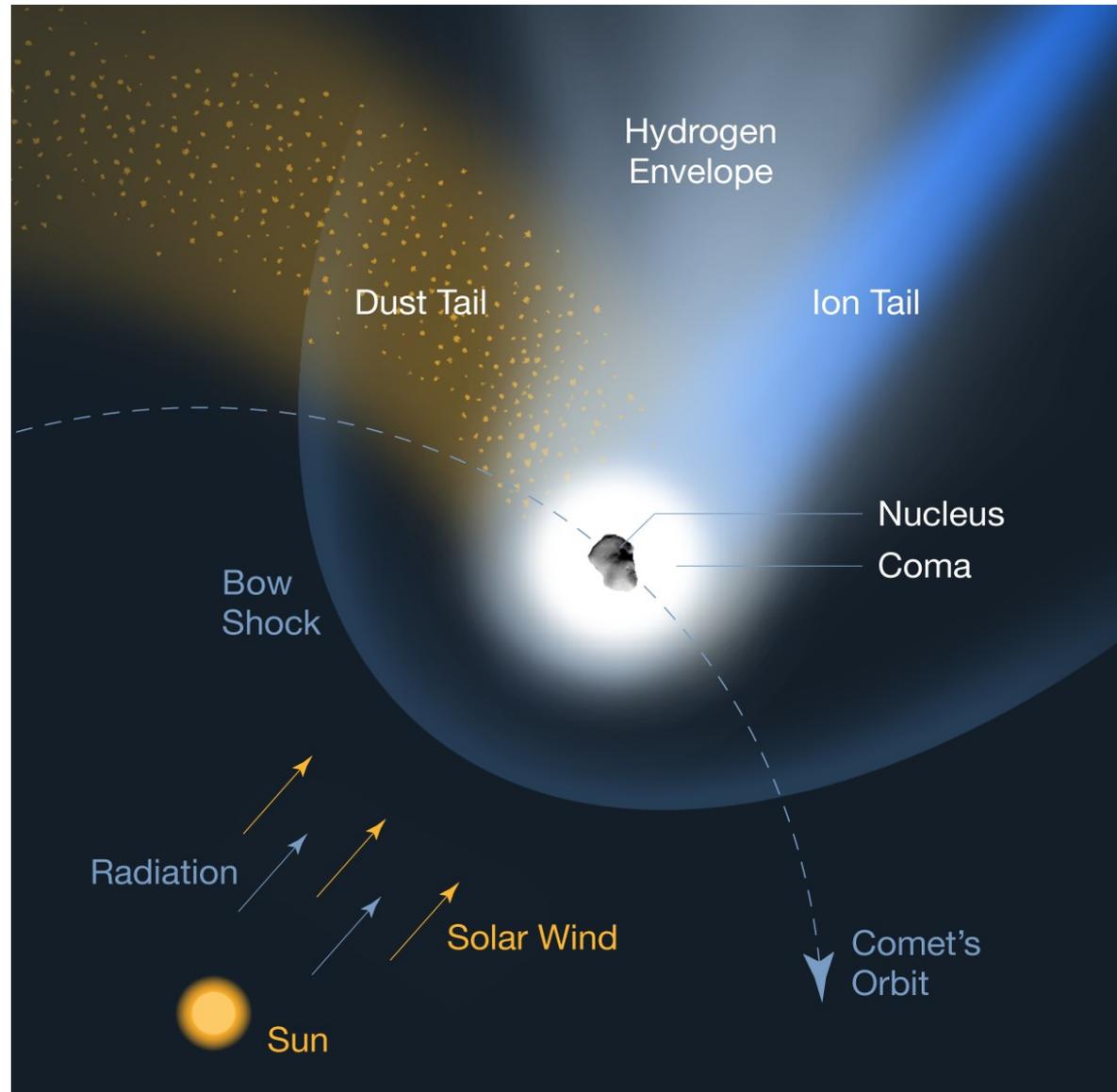
A NASA Hubble Space Telescope (HST) image of comet Shoemaker-Levy 9, taken on May 17, 1994, with the Wide Field Planetary Camera 2. When the comet was observed, its train of 21 icy fragments stretched across 1.1 million km, or 3 times the distance between Earth and the Moon.

Longe do Sol o cometa é só o núcleo, uma “bola de neve” suja de ~ 5 km

Ao se aproximar do Sol (~5 UA), o núcleo é aquecido, liberando compostos voláteis mais leves, que levam junto pequenas partículas de poeira, formando assim uma **coma de gás e poeira** de ~ 10^6 km

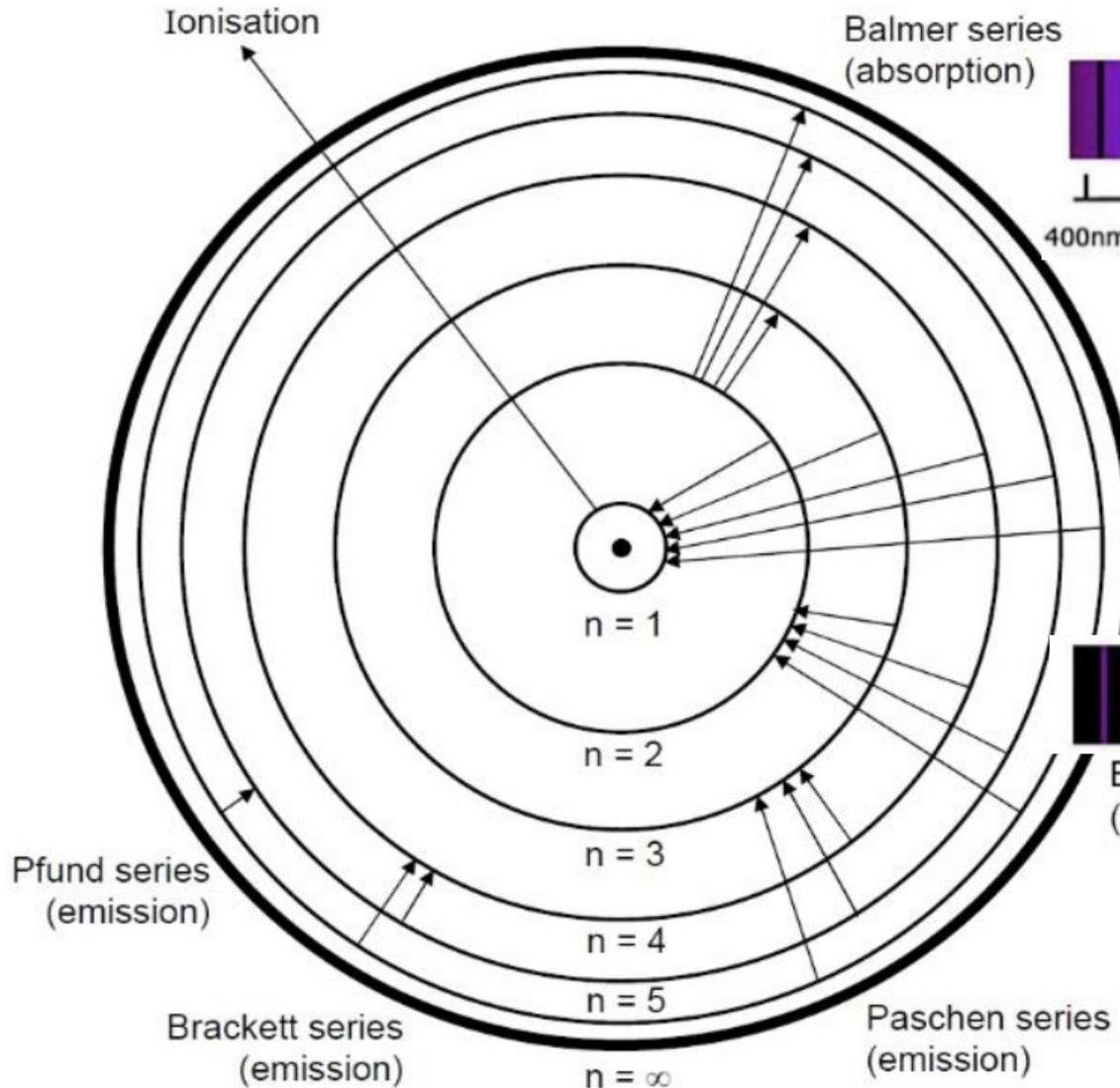
Poeira reflete a luz do Sol

O gás absorve a luz UV → ionização (ou excitação para um nível maior de energia) → emissão de luz na recombinação (ou por desexcitação)

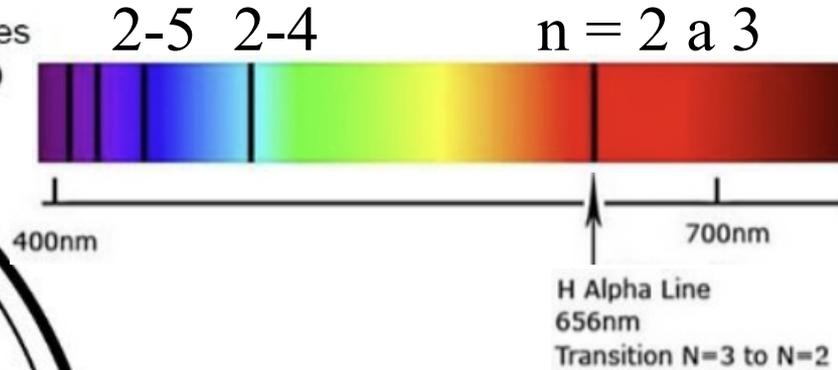


Átomo de hidrogênio

Absorção de fóton → elétron excitado

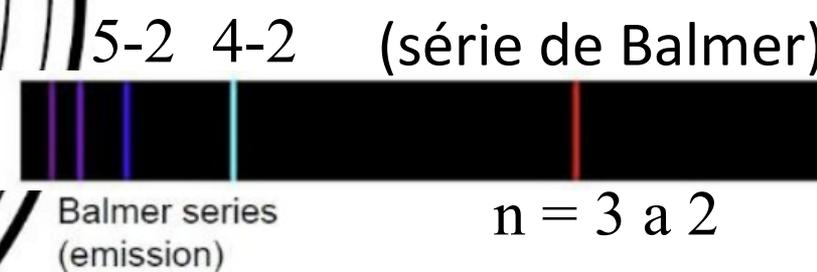


Espectro de absorção (Balmer)



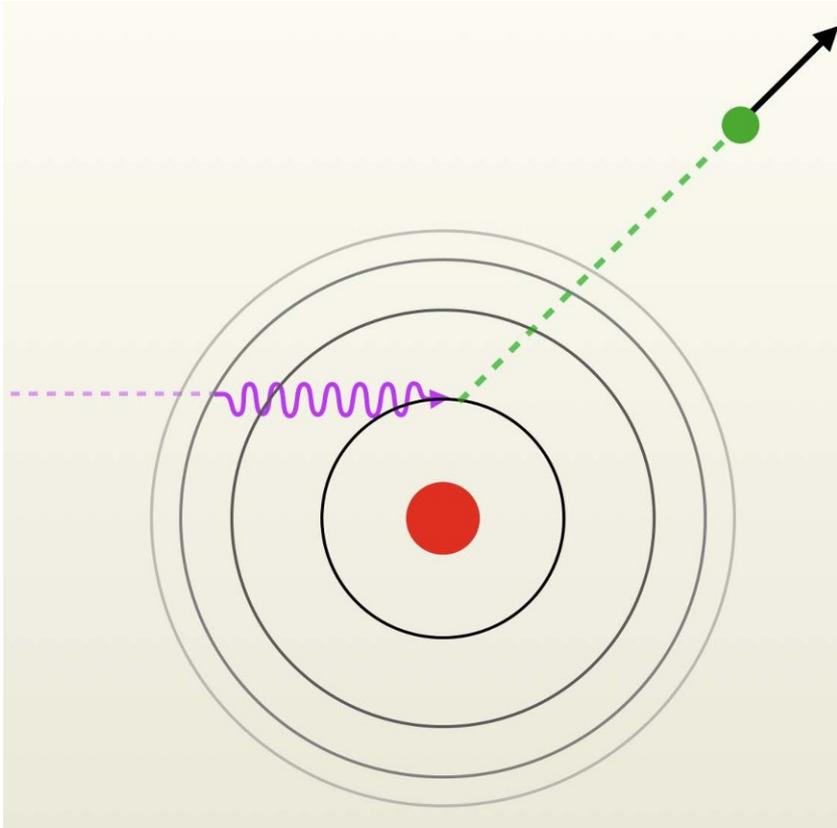
2-5 2-4 $n = 2$ a 3

Espectro de emissão

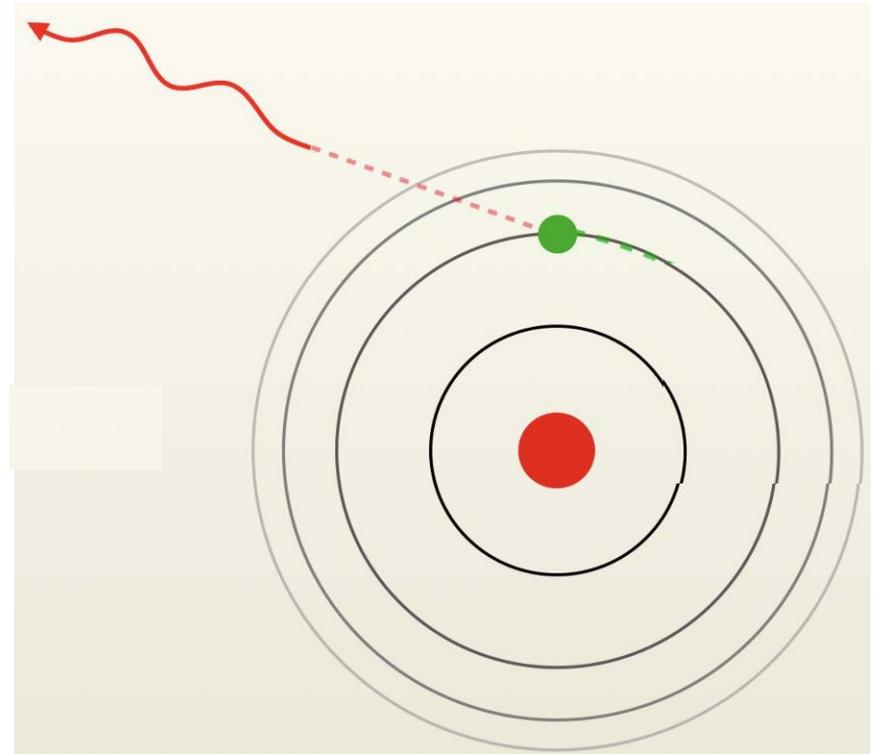


Elétron desexcitado
→ Emissão de fóton

Ionização
(fóton é absorvido)



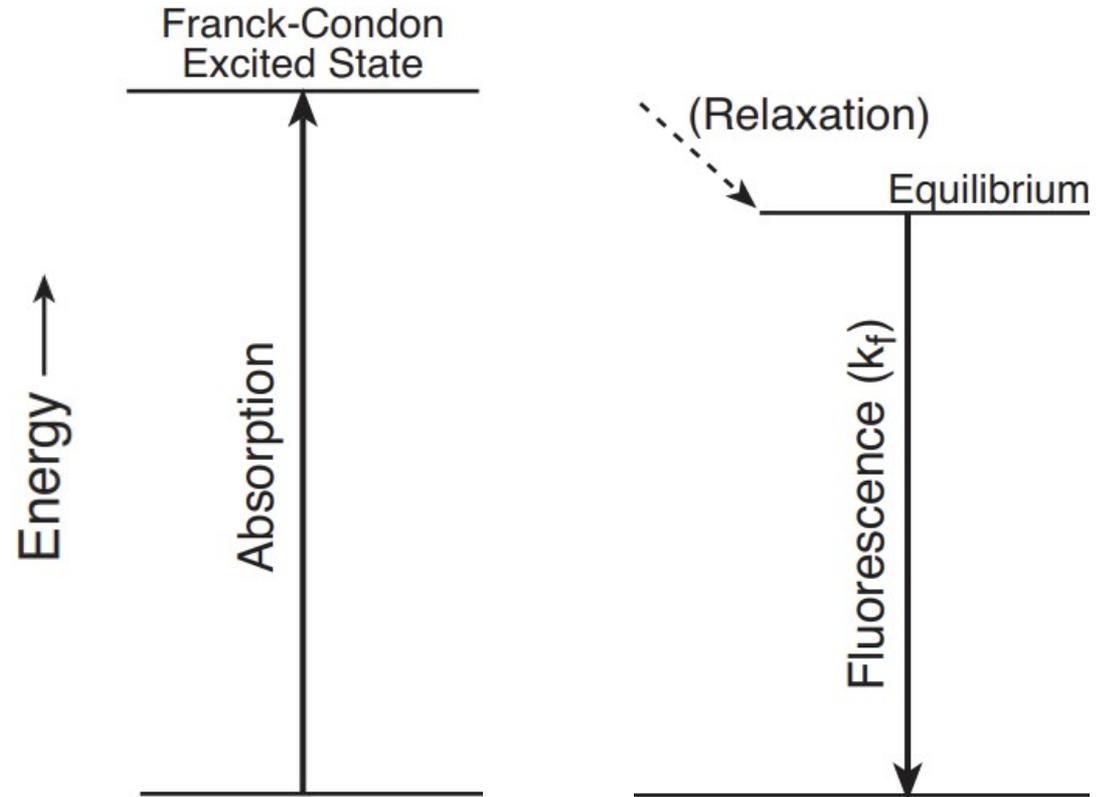
Recombinação
(fóton é emitido)



Fluorescência em moléculas

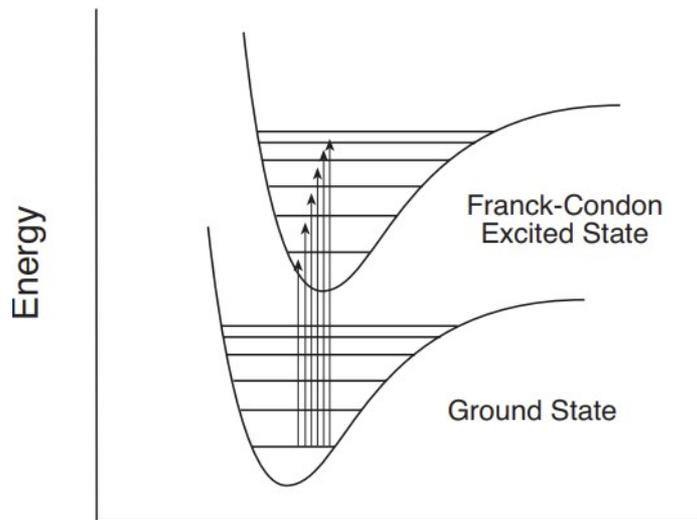
O fóton emitido pode ser de menor energia (maior comprimento de onda λ) que o fóton absorvido.

Ex.: fóton ultravioleta absorvido e fóton visível emitido



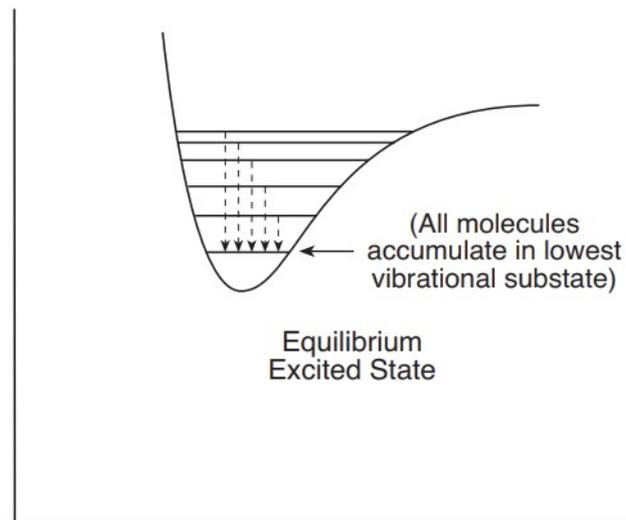
$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Absorption



Relaxation to Equilibrium Excited State

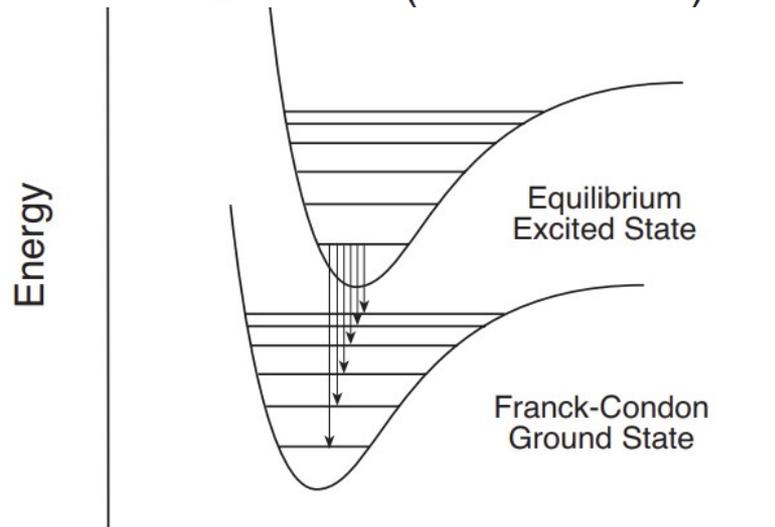
----->
(Picoseconds)



Internuclear Separation

Internuclear Separation

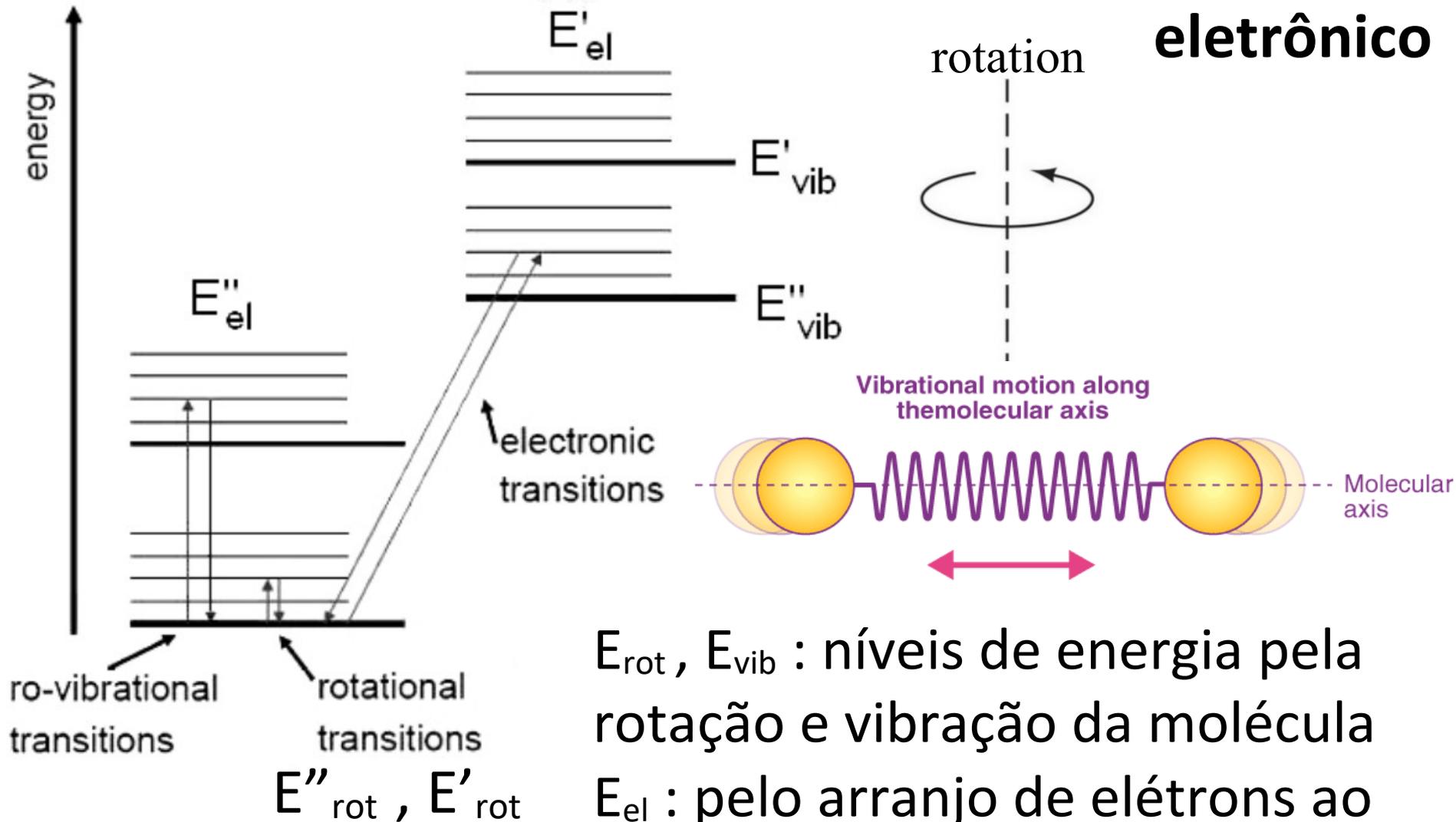
Photon Emission (Fluorescence)



Internuclear Separation

Fluorescência em moléculas

Níveis de energia da molécula: rotac., vibracional, eletrônico



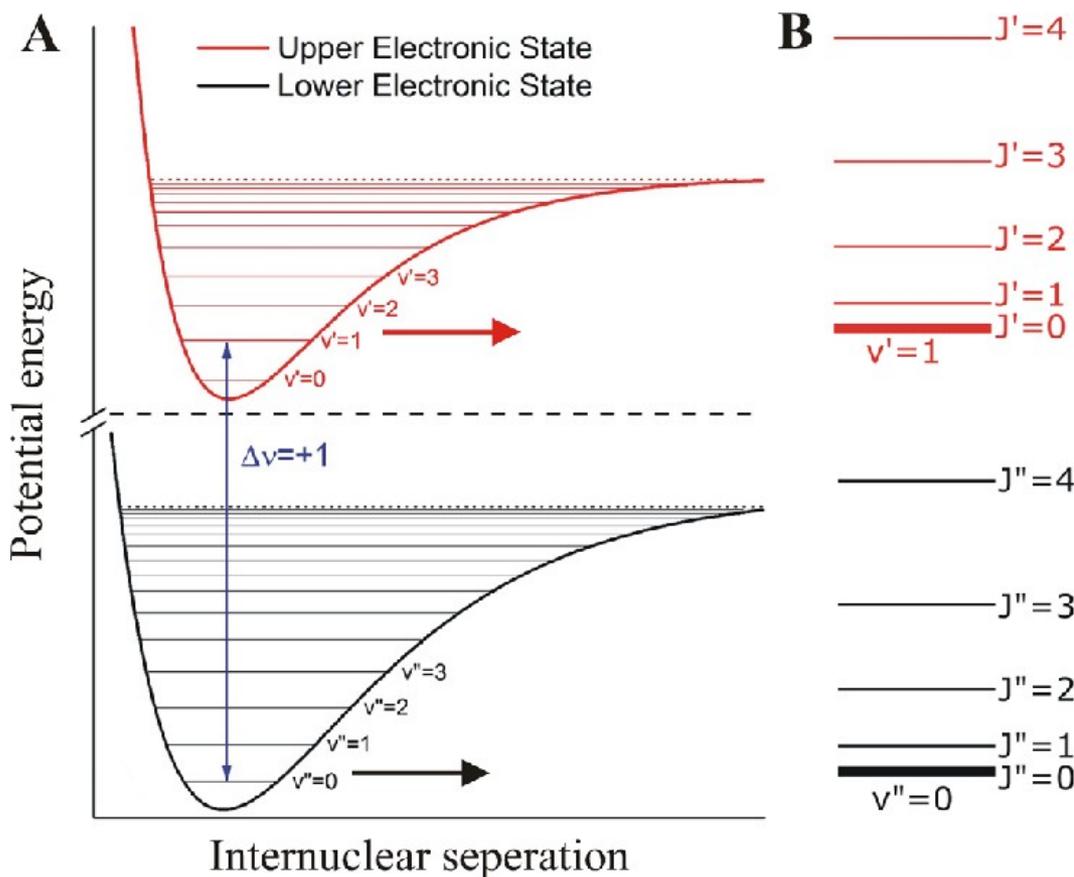
E_{rot} , E_{vib} : níveis de energia pela rotação e vibração da molécula

E_{el} : pelo arranjo de elétrons ao redor de seus vários núcleos

Níveis de energia: eletrônico, vibrac. (v) e rotac. (J)

$$\tilde{E}_{total} = \tilde{\nu}_{el} + G(v) + F(J)$$

$$\tilde{E}_{total} = \underbrace{\tilde{\nu}_{el}}_{\text{electronic}} + \underbrace{\tilde{\nu}_e \left(v + \frac{1}{2} \right) - \tilde{\chi}_e \tilde{\nu}_e \left(v + \frac{1}{2} \right)^2}_{\text{vibrational}} + \underbrace{\tilde{B}J(J+1) - \tilde{D}J^2(J+1)^2}_{\text{rotational}}$$



Com a energia inferior e superior \rightarrow

$$\Delta E = E_{\text{high}} - E_{\text{low}}$$

E a respectiva ν ou λ

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Banda vibracional $v = 0,1$ da molécula HCl

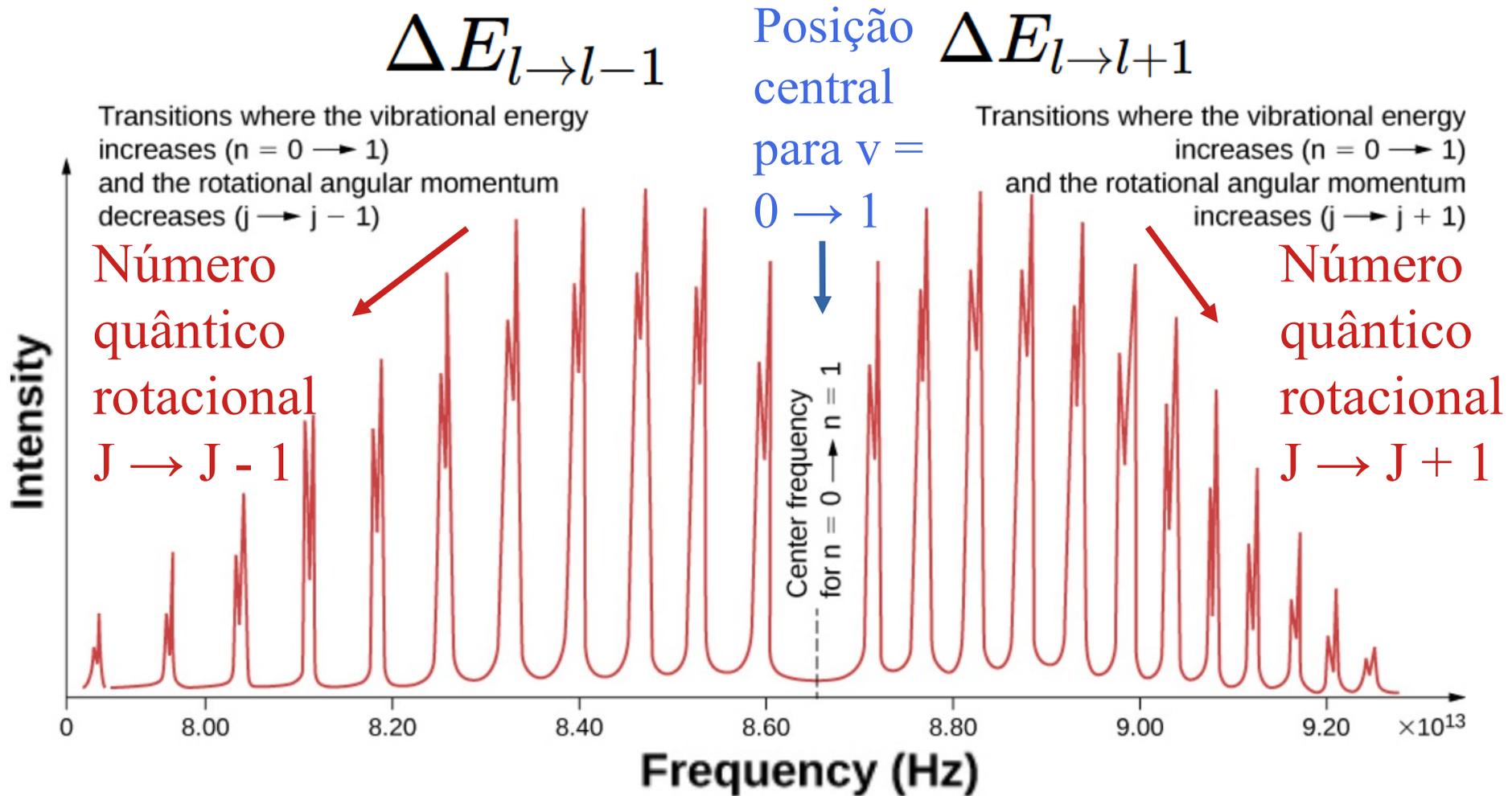
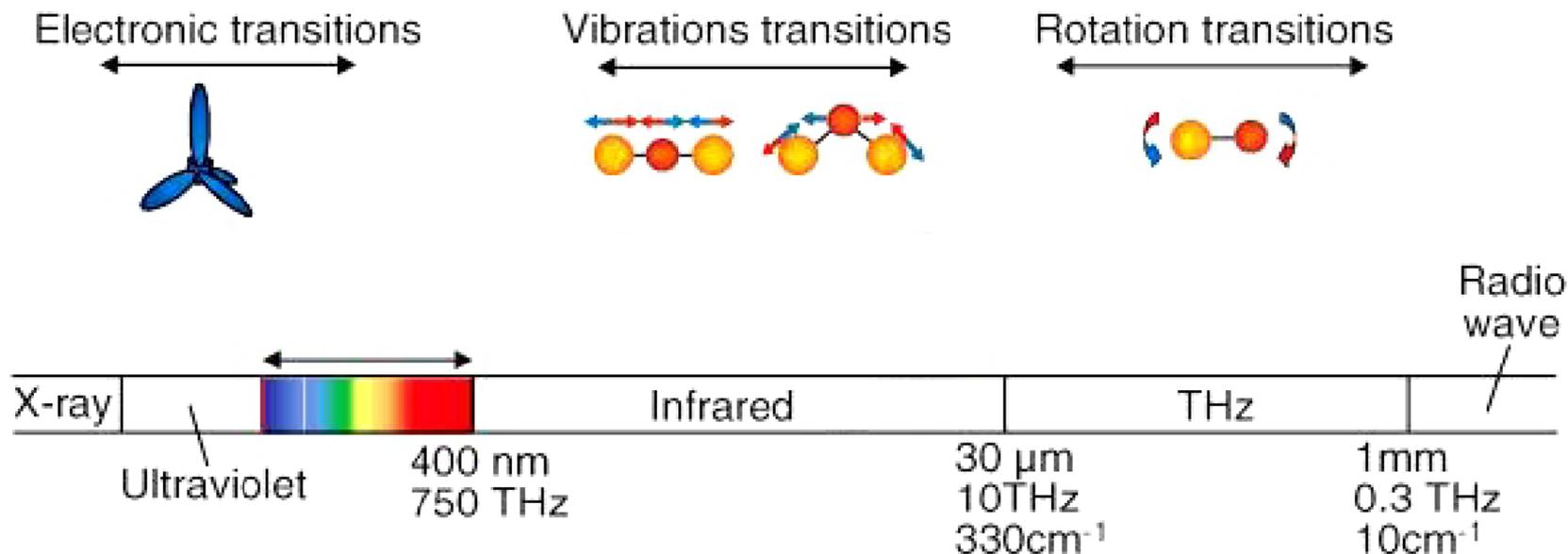


Figure 9.3.2: Absorption spectrum of hydrogen chloride (HCl) from the $n = 0$ to $n = 1$ vibrational levels. The discrete peaks indicate a quantization of the angular momentum of the molecule. The bands to the left indicate a decrease in angular momentum, whereas those to the right indicate an increase in angular momentum.

Transições eletrônicas são observadas principalmente no ultravioleta, vibro-rotacionais no visível e infravermelho, e puramente rotacionais no infravermelho e rádio



Detalhes desse slide só para contexto geral (não entra na P2)

A absorção das linhas é calculada via:

$$\kappa_{\lambda}^{mol} = \frac{\pi e^2}{m_e c^2} \lambda_0^2 g_{J''} f_{v'J',v''J''} N_{el,v'',J''}^{AB} \frac{H(a, u)}{\sqrt{\pi \Delta \lambda_D}} (1 - e^{-hc/\lambda_0 kT})$$

- $\Delta \lambda_D$ é a largura Doppler da linha, $\Delta \lambda_D = \frac{\lambda}{c} \sqrt{\frac{2kT}{m} + \eta^2}$, onde m é a massa
- λ_0 é o comprimento de onda do centro da linha
- $g_{J''}$ é o peso estatístico do estado rotacional do nível inferior ($g_{J''} = 2J'' + 1$).
- $f_{v'J',v''J''}$ é a força de oscilador molecular da linha.
- $N_{el,v'',J''}^{AB}$ é a população do nível el,v'',J'' da molécula AB por unidade de $g_{J''}$, dado por:
 - $H(a, u)$ é a função de Hjertings, depende de $u = \Delta \lambda / \Delta \lambda_D$ e de $a = (\lambda^2 \gamma / 4\pi c) / \Delta \lambda_D$.

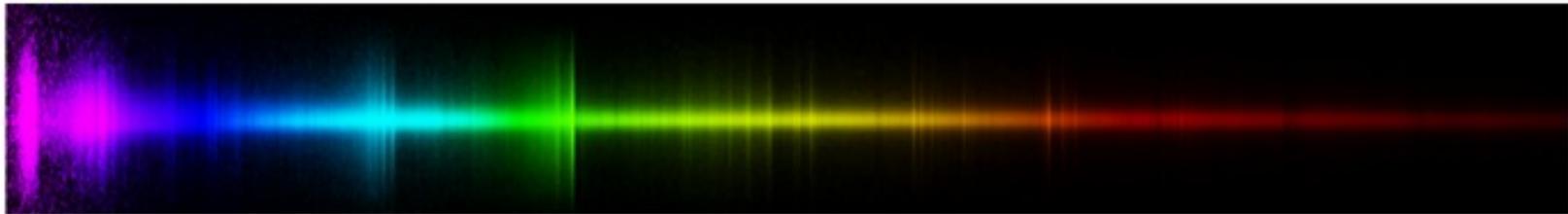
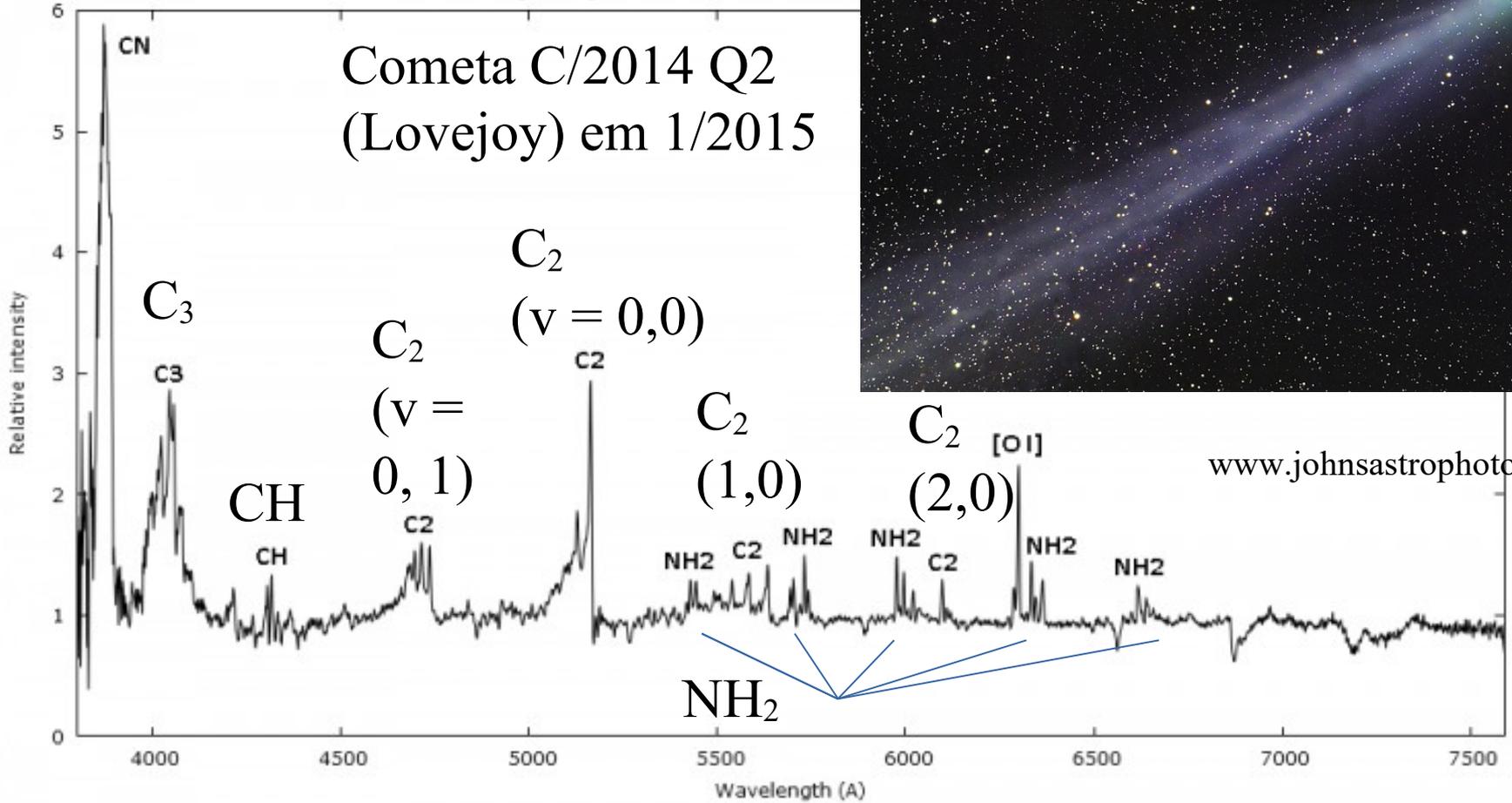
$$N_{el,v'',J''}^{AB} = \left(\frac{2\pi kT \mu}{h^2} \right)^{-3/2} \frac{N_A N_B}{Q_A Q_B} e^{D_0/kT} \frac{g_{el} g_{v''} g_{J''}}{g_{J''}} e^{-E_{el,v'',J''}/kT}$$

onde μ é o peso molecular médio, N_A e N_B são as abundâncias das espécies A e B , Q_A e Q_B são as funções de partição das espécies A e B , D_0 é o potencial de dissociação, $g_{el} g_{v''} g_{J''}$ são os pesos estatísticos dos estados eletrônico, vibracional e rotacional do nível inferior, e $E_{el,v'',J''}$ é a energia do nível inferior. Segundo Schadee (1964) $g_{el} = (2S''+1)(2 - \delta_{0,\Lambda''})$ e $g_v = 1$.

CN

C2014 Q2 Lovejoy 2015 Jan 6.860 C11 +

Cometa C/2014 Q2
(Lovejoy) em 1/2015



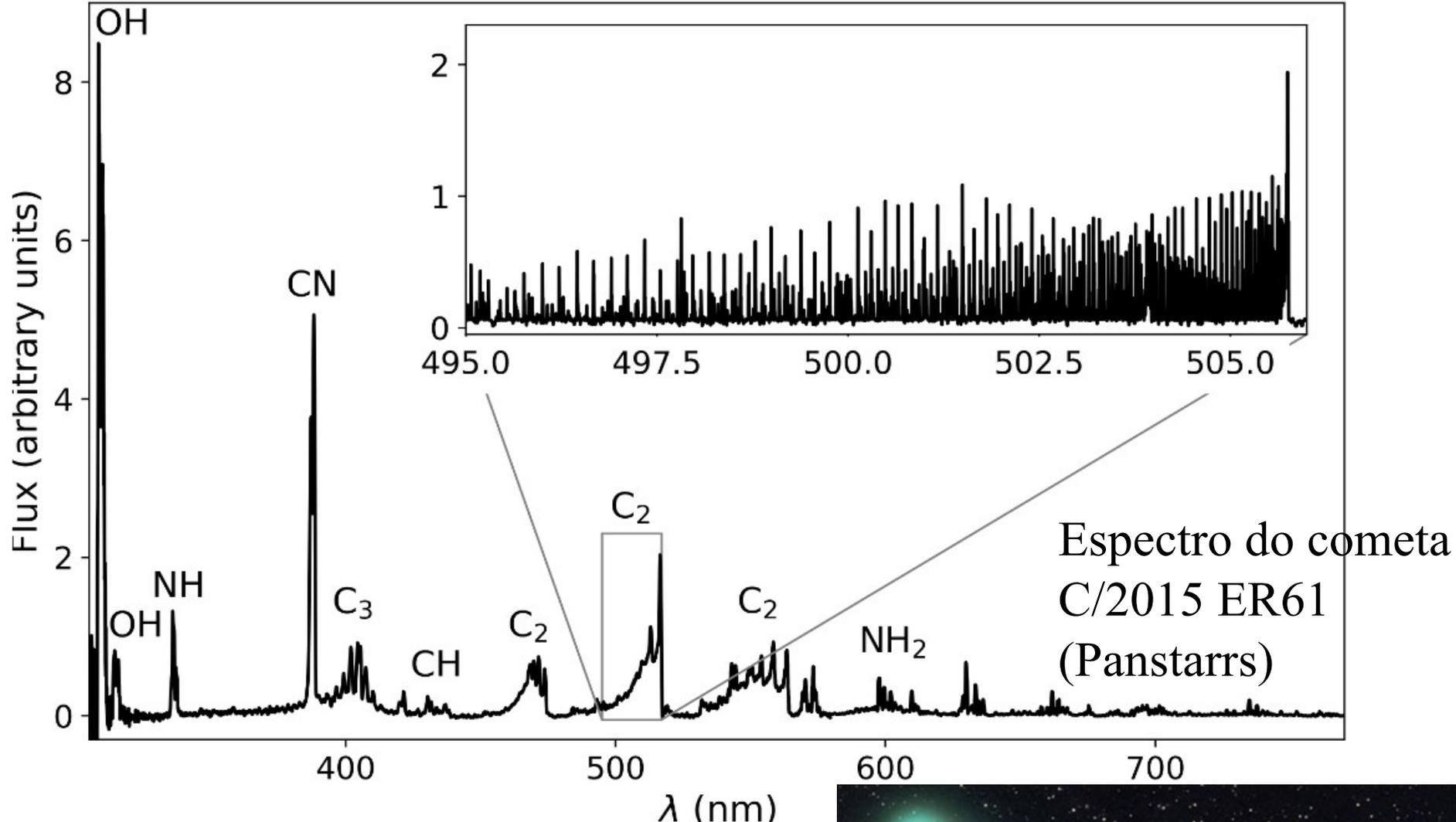


Fig. 4.— Optical spectrum of comet C/2015 ER61 (PANSTARRS) obtained with the ISIS spectrograph at the William Herschel Telescope (A. Fitzsimmons and M. Hyland, priv. comm.). The inset shows the region of the C₂ ($\Delta\nu = 0$) band observed with a much higher spectral resolution using the UVES spectrograph at the VLT (Yang et al. 2018).



These molecules are secondary products

HIGH-RESOLUTION SPECTRA OF C₂ SWAN BANDS FROM COMET WEST 1976 VI

DAVID L. LAMBERT

McDonald Observatory and Department of Astronomy, University of Texas

<https://www.eso.org/public/brazil/images/c-west-mar1976-ps/>

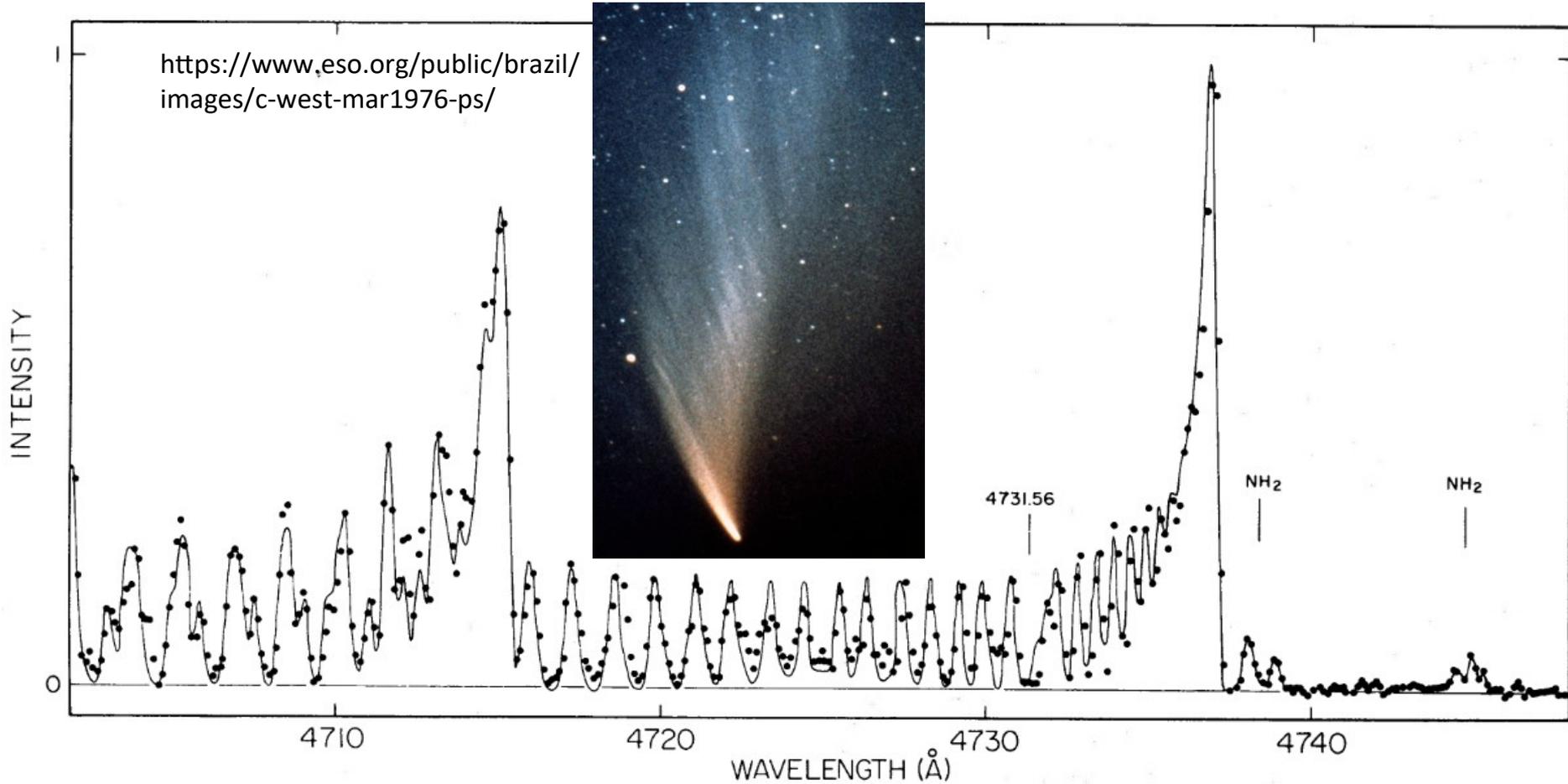


FIG. 1.—The C₂ Swan $\Delta v = +1$ sequence in comet West on 1976 March 21.

The solid line is a synthetic spectrum corresponding to an excitation temperature of 3500 K.

These molecules are secondary products

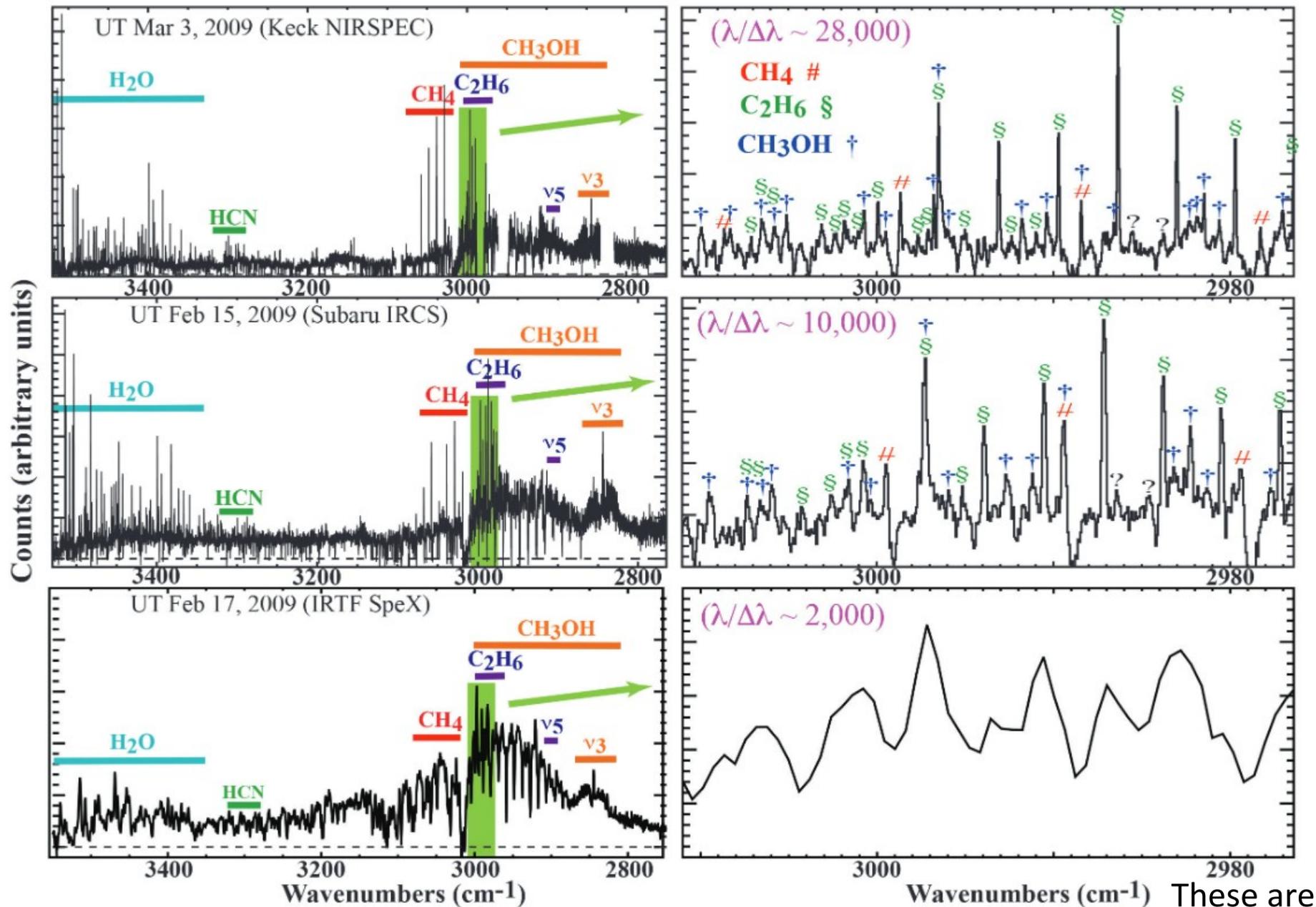


Fig. 3.— Near-IR spectra of comet C/2007 N3 Lulin obtained at different spectral resolving powers. This illustrates the density of ro-vibrational emissions from multiple species with overlapping vibrational bands in some spectral regions. High spectral resolving power is essential for disentangling and interpreting molecular contributions at IR wavelengths.

These are
primary
molecules

| Molecule | Name | Abundance relative to water in % | | |
|--------------------------------------|---------------------|---|------------|-----------------------------|
| | | from radio | from IR | in-situ in 67P ^a |
| CO | carbon monoxide | < 1.23–35 | 0.3–26 | 0.3–3 ^b |
| CO ₂ | carbon dioxide | - | 4–30 | 7.0 ^b |
| CH ₄ | methane | - | 0.15–2.7 | 0.4 ^b |
| C ₂ H ₆ | ethane | - | 0.1–2.7 | 0.8 ^b |
| C ₂ H ₂ | acetylene | - | 0.03–0.37 | - |
| C ₂ H ₄ | ethylene | - | 0.2 | - |
| C ₃ H ₈ | propane | - | - | 0.018 ± 0.004 |
| C ₆ H ₆ | benzene | - | - | 0.00069 ± 0.00014 |
| C ₇ H ₈ | toluene | - | - | 0.0062 ± 0.0012 |
| CH ₃ OH | methanol | 0.7–6.1 | < 0.13–4.3 | 0.5–1.5 ^b |
| H ₂ CO | formaldehyde | 0.13–1.4 ^d | < 0.02–1.1 | 0.5 |
| HCOOH | formic acid | 0.03–0.18 | - | 0.013 |
| CH ₃ CHO | acetaldehyde | 0.05–0.08 | - | 0.047 |
| c-C ₂ H ₄ O | ethylene oxide | < 0.006 | - | - |
| (CH ₂ OH) ₂ | ethylene glycol | 0.07–0.35 | - | 0.011 |
| CH ₃ OCH ₂ OH | methoxymethanol | < 9 | - | - |
| HCOOCH ₃ | methyl formate | 0.06–0.08 | - | 0.0034 |
| CH ₂ OHCHO | glycolaldehyde | 0.016–0.039 | - | - |
| CH ₃ COOH | acetic acid | < 0.026 | - | - |
| C ₂ H ₅ OH | ethanol | 0.11–0.19 | - | 0.10 ^b |
| CH ₃ OCH ₃ | dimethyl ether | < 0.025 | - | - |
| CH ₃ COCH ₃ | acetone | ≤ 0.011 | - | 0.0047 |
| C ₂ H ₅ CHO | propanal | - | - | - |
| CH ₂ CO | ketene | ≤ 0.0078 | - | - |
| N ₂ | molecular nitrogen | (< 0.002 – 1000 from N ₂ ⁺) ^c | - | 0.089 ± 0.024 |
| NH ₃ | ammonia | 0.18–0.60 | 0.1–3.6 | 0.4 ^b |
| HCN | hydrogen cyanide | 0.05–0.25 | 0.03–0.5 | 0.20 ^b |
| HNC | hydrogen isocyanide | 0.0015–0.035 | - | - |
| CH ₃ CN | methyl cyanide | 0.008–0.054 | - | 0.0059 |
| HC ₃ N | cyanoacetylene | 0.002–0.068 | - | 0.0004 |
| HNCO | isocyanic acid | 0.009–0.080 | - | 0.027 |
| NH ₂ CHO | formamide | 0.015–0.022 | - | 0.004 |
| C ₂ H ₃ CN | vinyl cyanide | < 0.0027 | - | - |
| C ₂ H ₅ CN | ethyl cyanide | < 0.0036 | - | - |
| C ₂ N ₂ | cyanogen | - | - | 0.0004 ± 0.0002 |
| H ₂ S | hydrogen sulphide | 0.09–1.5 | - | 2.0 ^b |
| SO | sulphur monoxide | 0.04–0.30 | - | 0.071 |
| SO ₂ | sulphur dioxide | 0.03–0.23 | - | 0.127 |
| CS | carbon monosulphide | 0.03–0.20 | - | - |
| CS ₂ | carbon disulphide | - | - | 0.02 ^b |
| OCS | carbonyl sulphide | 0.05–0.40 | 0.04–0.40 | 0.07 ^b |
| H ₂ CS | thioformaldehyde | 0.009–0.090 | - | 0.0027 |
| S ₂ | sulphur dimer | (0.001–0.25) ^c | - | 0.002 |
| NS | nitrogen sulphide | 0.006–0.012 | - | - |
| CH ₃ SH | methyl mercaptan | < 0.023 | - | 0.038 |
| HF | hydrogen fluoride | 0.018 | - | 0.003–0.048 |
| HCl | hydrogen chloride | < 0.011 | - | 0.002–0.059 |
| HBr | hydrogen bromide | - | - | 0.00012–0.00083 |
| PH ₃ | phosphine | < 0.07 | - | < 0.003 |
| PN | phosphorus nitride | < 0.003 | - | < 0.001 |
| PO | phosphorus oxide | < 0.013 | - | 0.011 |
| CH ₃ NH ₂ | methylamine | < 0.055 | - | - |
| NH ₂ CH ₂ COOH | glycine I | < 0.18 | - | 0.000017 |
| Ar | argon | - | - | 0.00058 ± 0.00022 |
| Kr | krypton | - | - | 0.000049 ± 0.000022 |
| Xe | xenon | - | - | 0.000024 ± 0.000011 |
| O ₂ | molecular oxygen | - | - | 2.0 ^b |

Diversas moléculas na coma

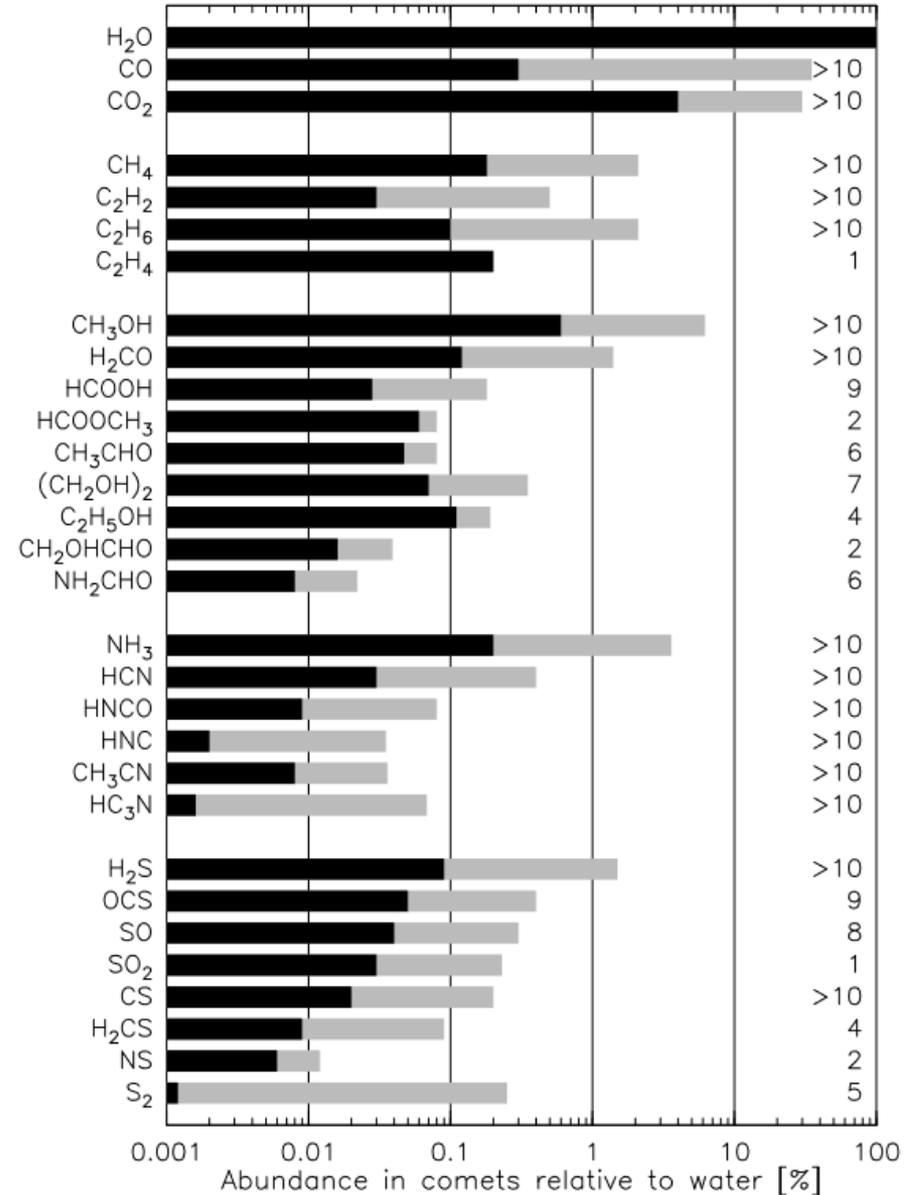
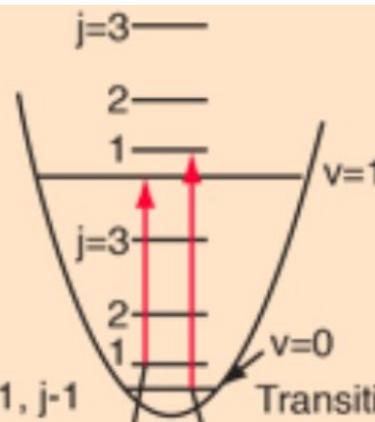


Fig. 9.— The range of abundances relative to water for the molecules observed remotely in cometary comae. The number of comets in which the molecule has been detected is indicated to the right (updated from [Bockelée-Morvan and Biver 2017](#)).

Vibration-Rotation Transitions

Transitions from the ground vibrational state to the first excited state of HCl with a change $\Delta j = \pm 1$ in rotational angular momentum.



Ex.: espectro vibro-rotacional de H^{35}Cl e H^{37}Cl da banda $v=0,1$ no *infrared*

Transitions $v=0, j$ to $v=1, j-1$ Transitions $v=0, j$ to $v=1, j+1$

^{35}Cl
 ^{37}Cl

$j=1 \rightarrow 0$ $j=0 \rightarrow 1$

Center frequency
for $v=0 \rightarrow v=1$

8.00

8.20

8.40

8.60

8.80

9.00

9.20

$\times 10^{13}$

Frequency (Hz)

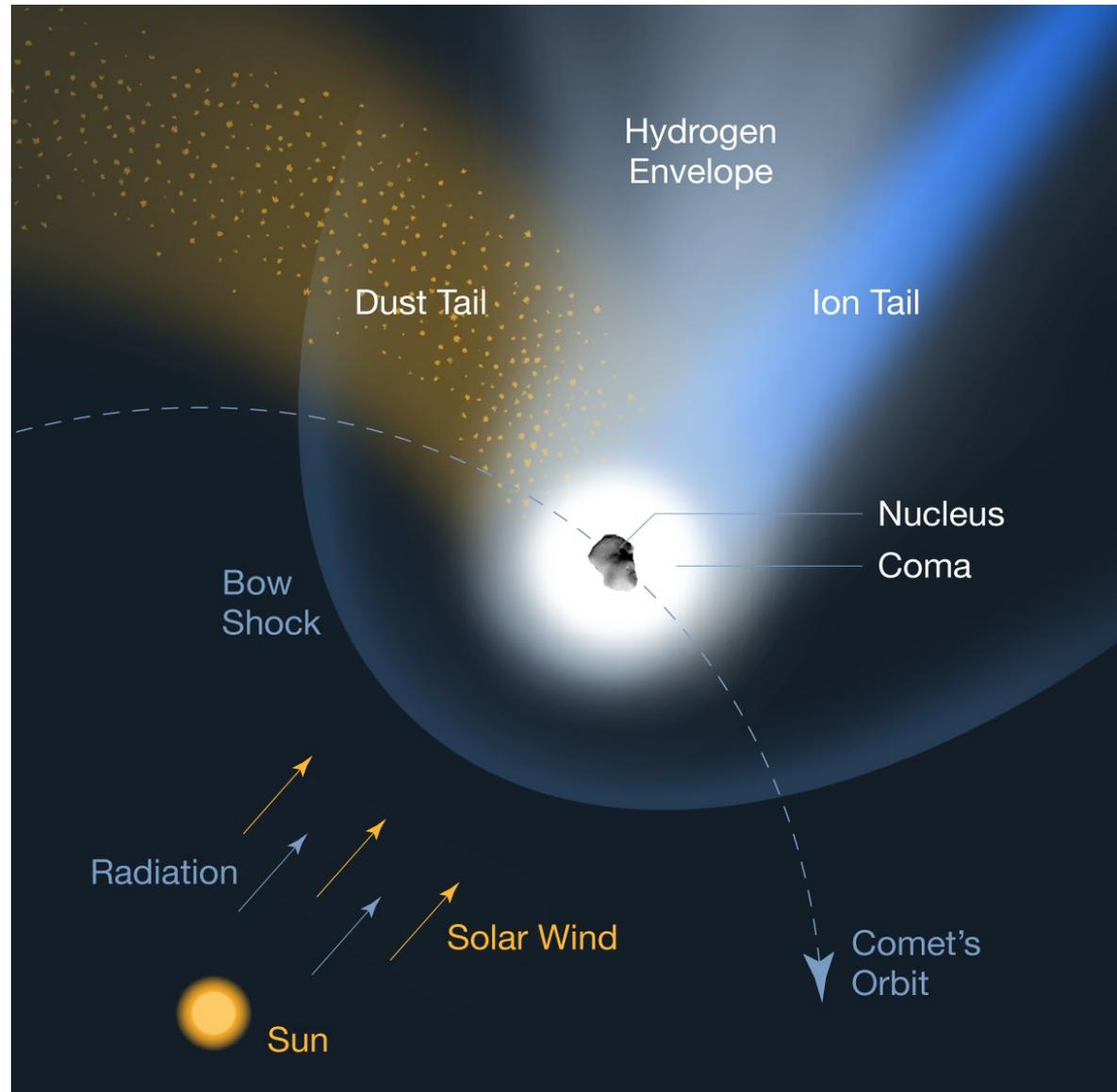
3750 nm

3330 nm

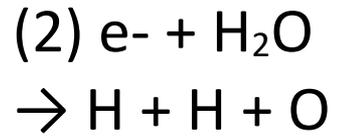
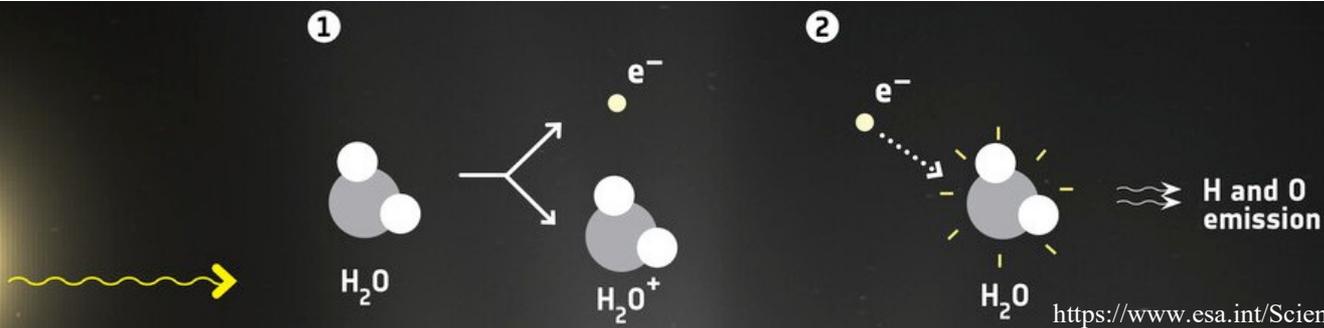
Envelope de hidrogênio

Ao se aproximar do Sol a molécula de água (H_2O) é quebrada, liberando átomos de hidrogênio energéticos, que formam um envelope de $\sim 10^7$ km.

Não observamos esse envelope da Terra, pois a emissão do hidrogênio em estado de alta energia acontece no UV extremo (121 nm), que é bloqueado pela camada de ozônio.

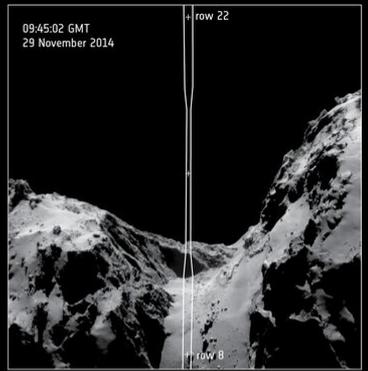


Envelope de hidrogênio: (1) fóton UV + H₂O → H₂O⁺ + e⁻



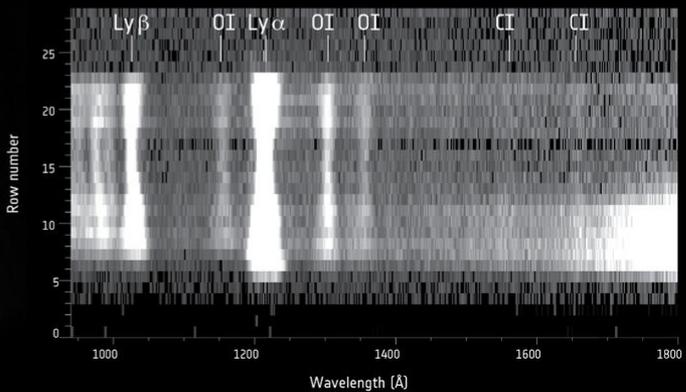
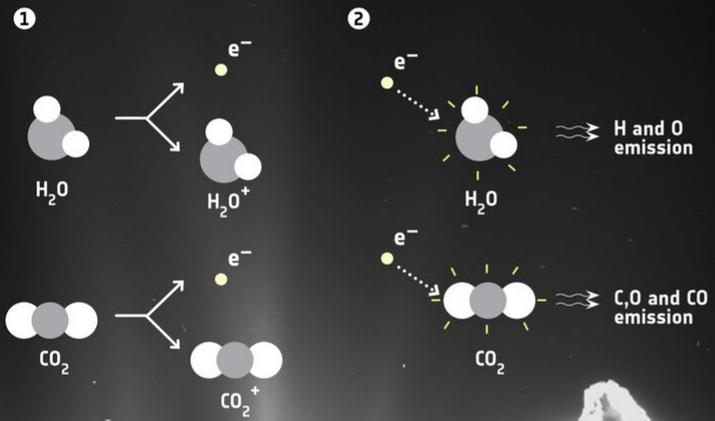
https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Rosetta/Ultraviolet_study_reveals_surprises_in_comet_coma 

Rosetta's close study of Comet 67P/Churyumov–Gerasimenko at ultraviolet wavelengths has revealed that electrons and not photons are responsible for the rapid breakup of water and carbon dioxide molecules erupting from the surface.



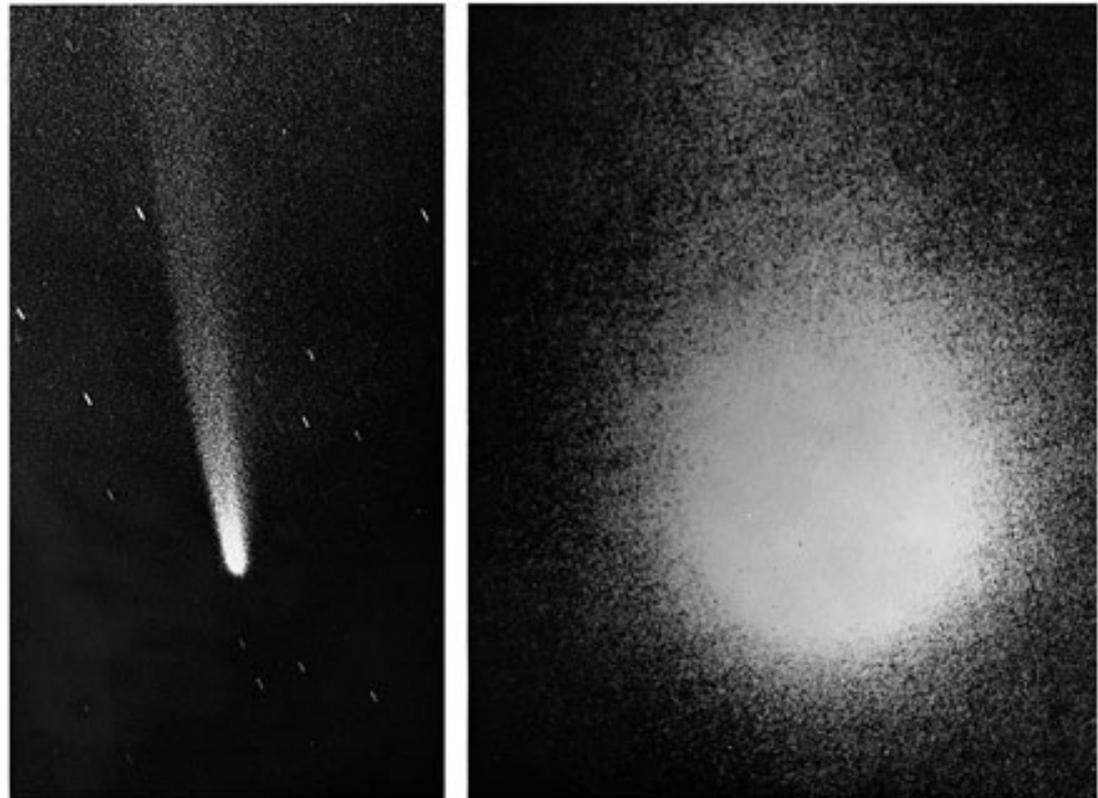
The data were collected between August and November 2014

Example of a spectral image (below) obtained by Alice for positions in the comet's coma indicated in the NavCam image (above). The emission by oxygen (OI) and carbon (CI) in the coma are indicated. The bright bands labelled Lyα and Lyβ are due to electron impact on H₂O.

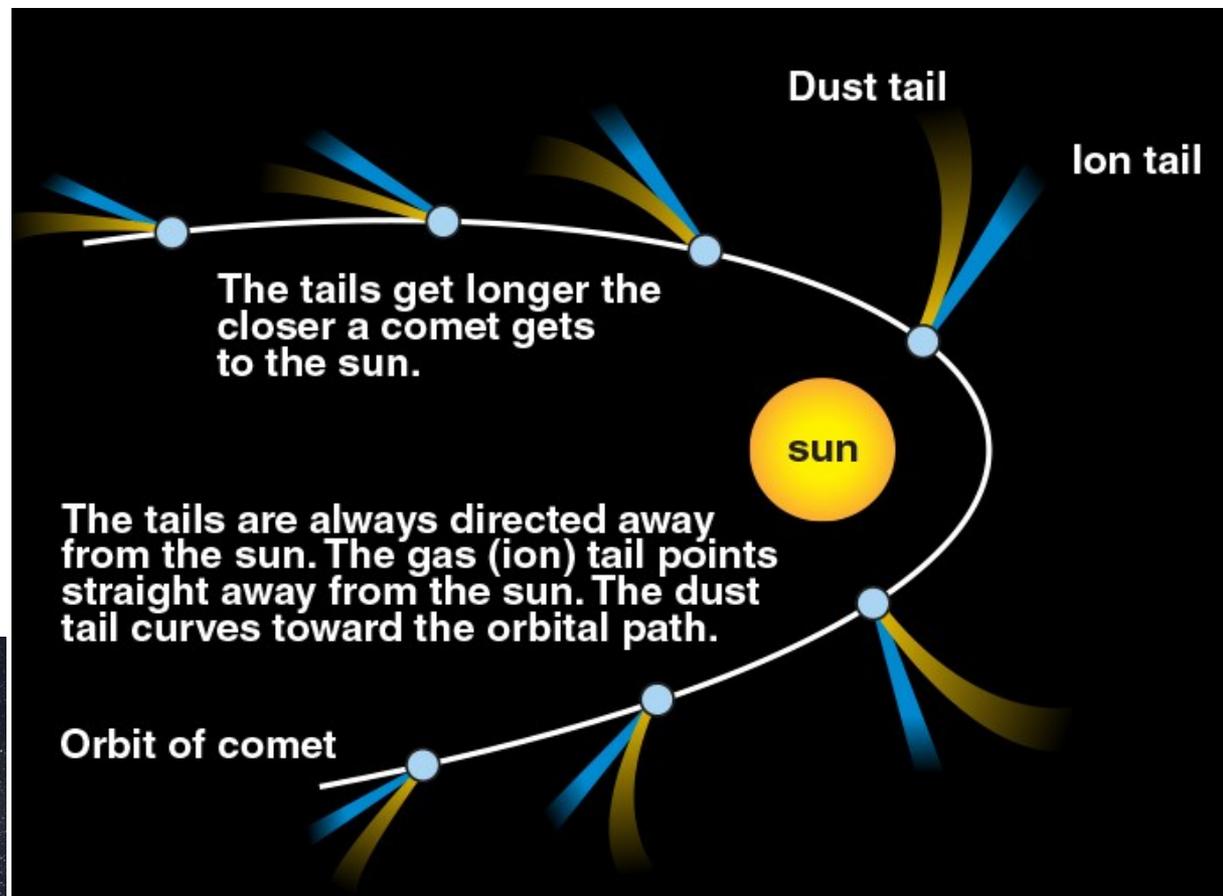


- 1 Solar photons ionise comet water and carbon dioxide molecules, producing electrons
- 2 Electrons impact other water and carbon dioxide molecules, creating emission detected by Alice

Comparação da imagem visível (esquerda) do cometa Kohoutek com uma imagem no ultravioleta extremo (direita) na mesma escala, tirada em 4 e 7 de janeiro de 1974. A imagem UV mostra um gigantesco **envoltório de hidrogênio** de 10^7 km, alimentado pelo núcleo do cometa a uma taxa de 5×10^{29} átomos de H por segundo. Esse imenso envoltório se deve a que os átomos de hidrogênio são muito mais leves que outras espécies. (c) Chet B. Opal, NRL.



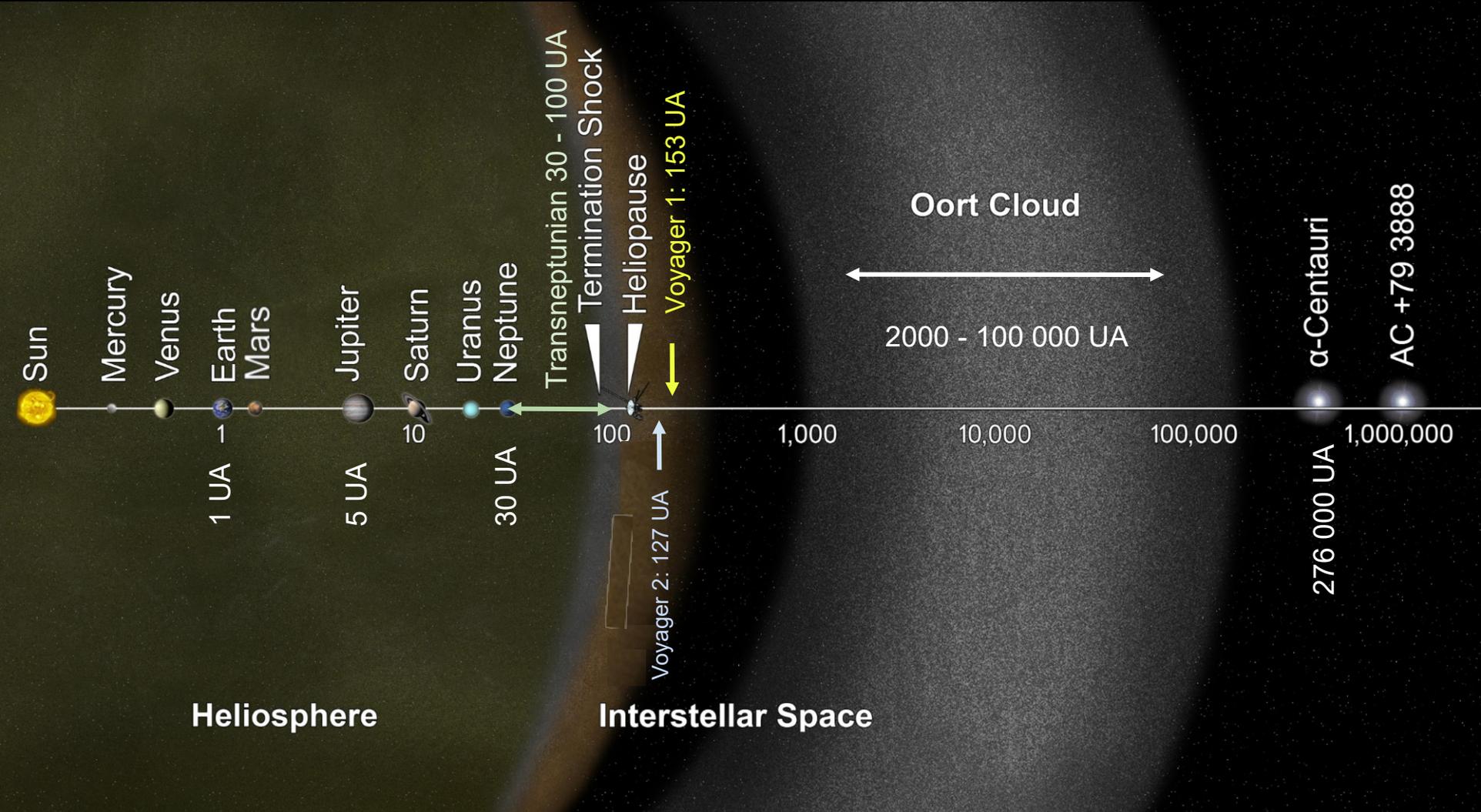
A uma distância de ~10UA do Sol o cometa começa a desenvolver a coma, e a ~5UA caudas começam a ser visíveis.



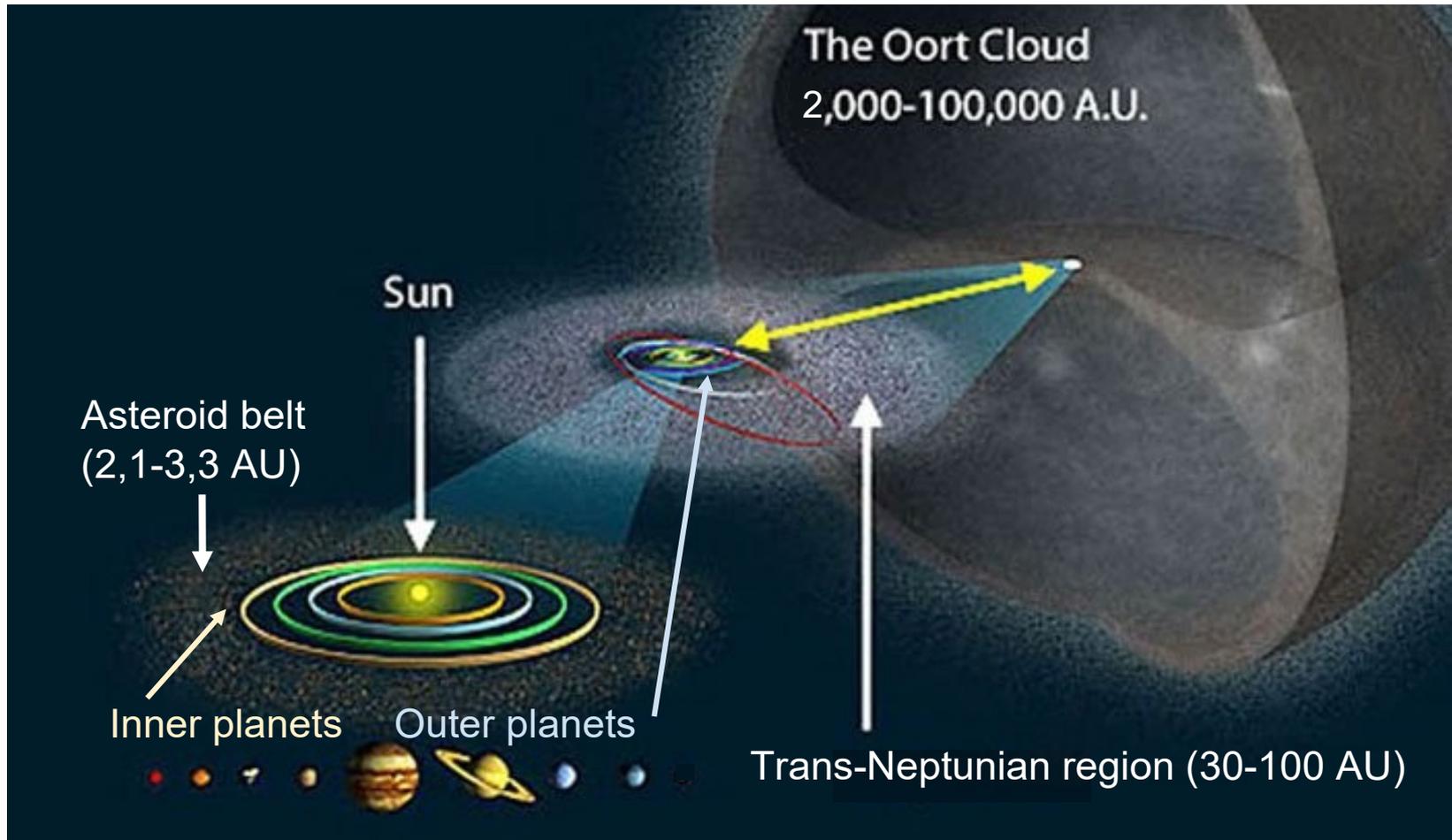
Cometa Hale-Bopp, em 14 de março de 1997.
(c) ESO/E. Slawik

Origem dos cometas: Região transnetuniana e Nuvem de Oort

Imagem fora de escala



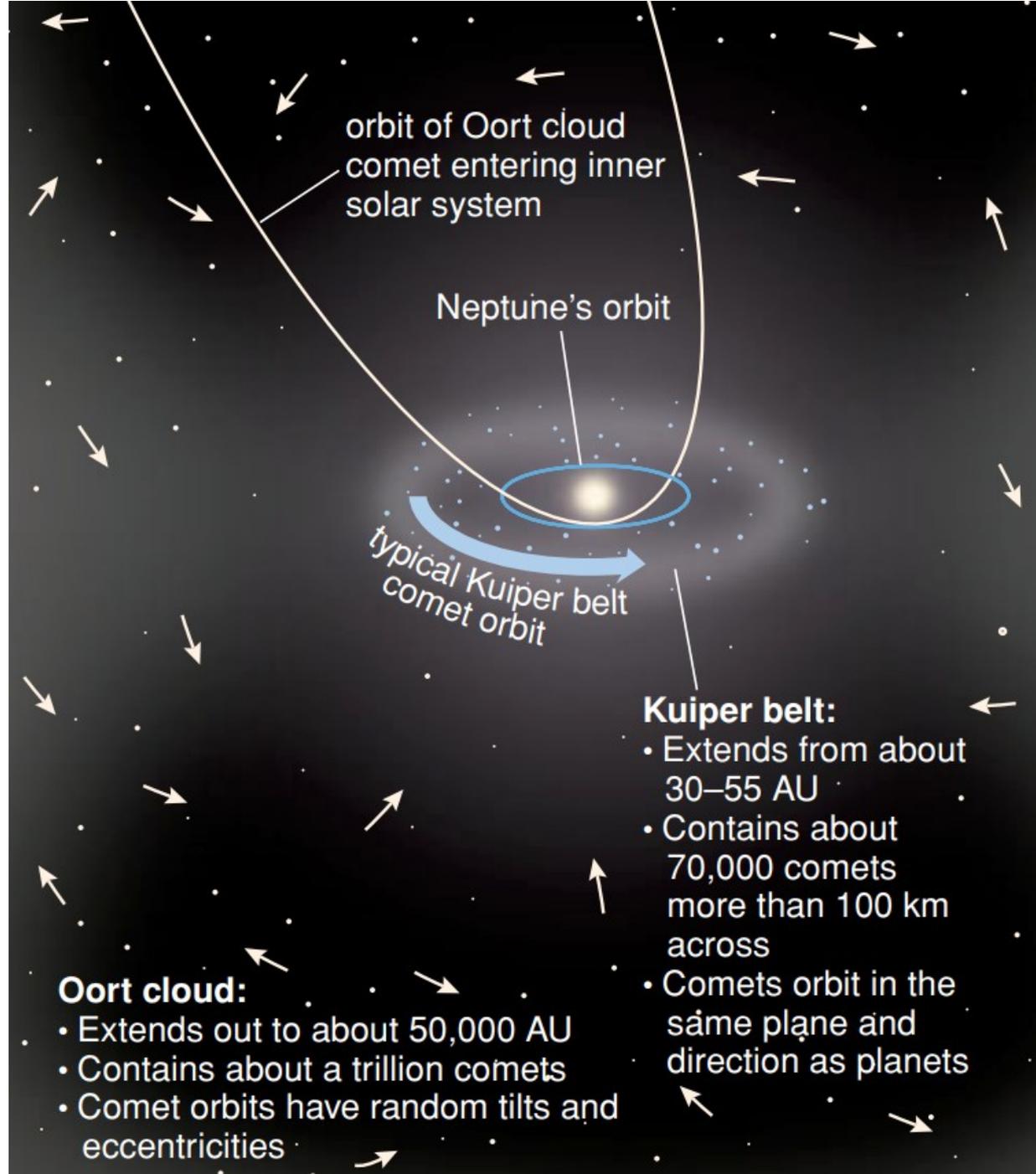
A nuvem de Oort consiste em planetesimais ($\sim 10^{12}$ corpos $> 1\text{km}$) rochosos e gelados lançados para fora pelos planetas gigantes (sobretudo Urano e Netuno, e em menor número por Júpiter), mas não rápido o suficiente para escapar do Sistema Solar. As órbitas foram randomizadas pela força de maré da Galáxia e a força gravitacional das estrelas e matéria interestelar.



Devido a perturbações, corpos gelados podem ser lançados para o Sistema Solar interno. Geralmente as órbitas dos cometas são bem elípticas.

Os transnetunianos (Cinturão de Kuiper) têm inclinação baixa a moderada, próximos ao plano do Sistema Solar.

Já os associados à Nuvem de Oort têm inclinações aleatórias.



Órbitas de cometas. As órbitas cometárias são geralmente elípticas e muito alongadas. Os cometas são classificados pelo período orbital em curto período (<200 anos) e longo período (≥ 200 anos).

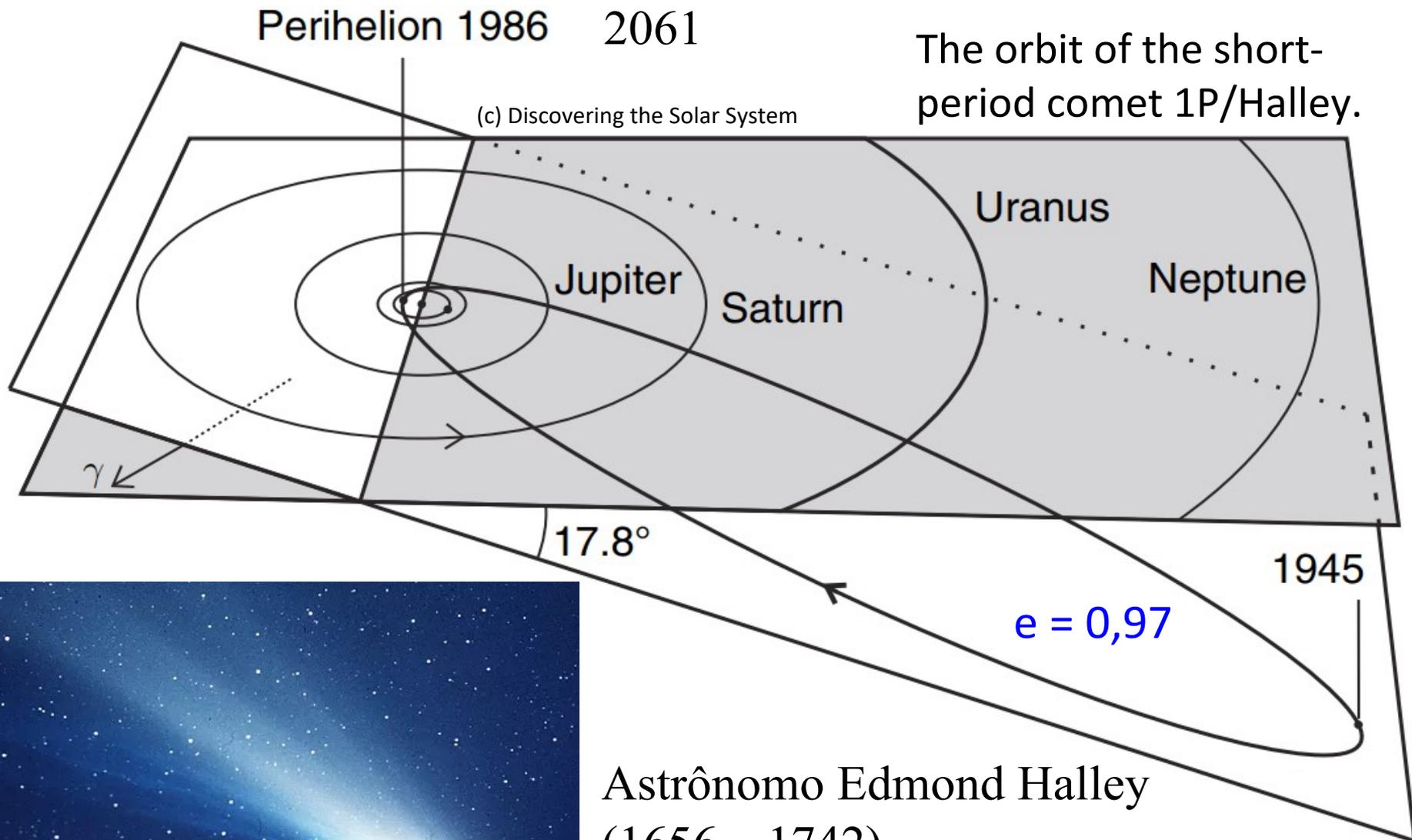
$P = 200$ anos, como $a = P^{2/3}$ (3ª lei de Kepler) $\rightarrow a = 34$ UA

Curto período (<200 anos). Boa parte tem $P < 15 - 20$ anos e são chamados **cometas da família de Júpiter**. As inclinações são $i < 35^\circ$ (mediana 11°). Cometas com $P = 15 - 20$ até 200 anos são **cometas tipo Halley**; as inclinações são maiores e às vezes são retrógradados.

Table 1.4 Some properties of selected comets

(c) Discovering the Solar System

| Name | Some orbital properties | | | | | | Associated meteor shower(s) | |
|----------------------------|-------------------------|------------------------|--------------|----------------|-------------------------|-------------------------------|-----------------------------|----------|
| | Semimajor axis/ AU | Sidereal period/ years | Eccentricity | Inclination/ ° | Perihelion distance/ AU | Date, last perihelion passage | | |
| <i>Short period</i> | | | | | | | | |
| 21P/Giacobini–Zinner | 3.53 | 6.62 | 0.7057 | 31.81 | 1.0337 | July 2005 | Giacobinids | Oct |
| 3D/Biela ^a | 3.53 | 6.62 | 0.756 | 12.55 | 0.861 | 1852 (lost) | Andromedids | Nov |
| 1P/Halley | 17.94 | 75.98 | 0.9673 | 162.24 | 0.5871 | Feb 1986 | Eta Aquarids | May |
| 109P/Swift–Tuttle | 26.32 | 135.01 | 0.9636 | 113.43 | 0.9582 | Dec 1992 | Perseids | July–Aug |
| 2P/Encke | 2.22 | 3.30 | 0.8473 | 11.77 | 0.3385 | Dec 2003 | Taurids | Oct–Nov |
| 36P/Whipple | 4.17 | 8.51 | 0.2590 | 9.93 | 3.0882 | July 2003 | — | |
| 29P/Schwassmann–Wachmann 1 | 5.99 | 14.65 | 0.0442 | 9.39 | 5.7236 | July 2004 | — | |
| 39P/Oterma | 7.24 | 19.49 | 0.2446 | 1.94 | 5.4707 | Dec 2002 | — | |
| 23P/Brorsen–Metcalfé | 17.07 | 70.53 | 0.9720 | 19.33 | 0.4789 | Sept 1989 | — | |



Astrônomo Edmond Halley
(1656 – 1742).

Cometa 1531, 1607, 1682 → 1758

Halley's Comet taken in 1986. (c) NASA



Nossa existência é um mero piscar de olhos em escalas astronômicas

2/1986 ($m = +2,1$), 7/2061 ($m = -0,3$), 3/2134 ($m = -2$)

Data e (magnitude) no periélio. $P \sim 76$ anos (74,42 a 79,25)

Nascidos em 2054 poderão ver o Halley aos ~ 7 e ~ 80 anos!

Longo período (≥ 200 anos). Na maioria dos casos $P \gg 200$ anos, chegando até 10 milhões de anos ($a = 10^4$ UA).

Devido ao longo período, para a maioria só existe registro de 1 passagem. As inclinações são distribuídas aleatoriamente.

Cometa Hale-Bopp,
14 de março de 1997.
(c) ESO/E. Slawik



Table 1.4 Some properties of selected comets (c) Discovering the Solar System

| Name | Some orbital properties | | | | | |
|-----------------------------------|-------------------------|------------------------|--------------|----------------|-------------------------|-------------------------------|
| | Semimajor axis/ AU | Sidereal period/ years | Eccentricity | Inclination/ ° | Perihelion distance/ AU | Date, last perihelion passage |
| <i>Long period (bright)</i> | | | | | | |
| C/1843 D1 Great Comet of 1843 | 640 | 16 000 | 0.99 99 914 | 114.35 | 0.005 527 | 1843 |
| C/1858 L1 Donati | ~ 150 | ~ 1700 | 0.99 6 | 116.96 | 0.578 | 1858 |
| C/1956 R1 Arend–Roland | Large | Long | 1.00 0 | 119.95 | 0.316 | 1957 |
| C/1957 P1 Mrkos | Large | Long | 0.99 9 | 93.94 | 0.355 | 1957 |
| C/1962 C1 Seki–Lines | Large | Long | 1.00 0 | 65.01 | 0.031 397 | ~ 1962/3 |
| C/1965 S1 Ikeya–Seki ^b | 92 | 880 | 0.999 915 | 141.86 | 0.007 786 | 1965 |
| C/1969 Y1 Bennett | 141.9 | 1690 | 0.996 210 6 | 90.04 | 0.537 606 3 | 1971 |
| C/1973 E1 Kohoutek | — | — | 1.000 007 9 | 14.30 | 0.142 | 1973 |
| C/1975 V1 West ^c | — | — | > 1.000 | 43.07 | 0.197 | 1976 |
| C1996 B2 Hyakutake ^d | 923.8 | 2808 | 0.999 750 8 | 124.92 | 0.230 220 7 | 1996 |
| C/1995 O1 Hale–Bopp ^d | 185.3 | 2521 | 0.995 065 4 | 89.43 | 0.914 141 0 | 1997 |

Cometa Hale-Bopp, em 14 de março de 1997.

(c) ESO/E. Slawik

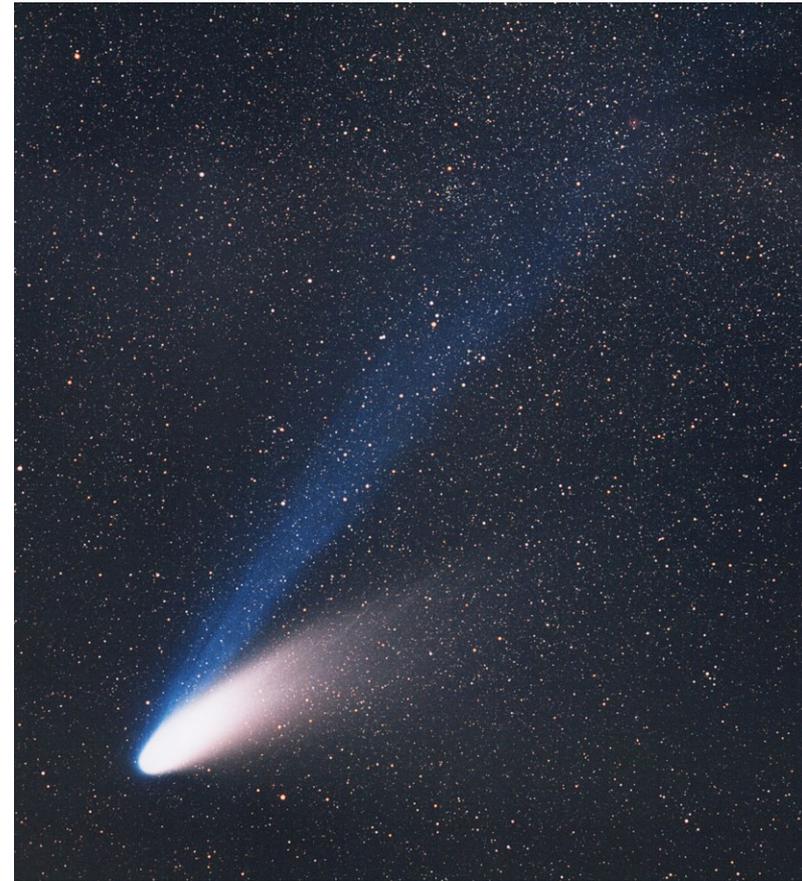
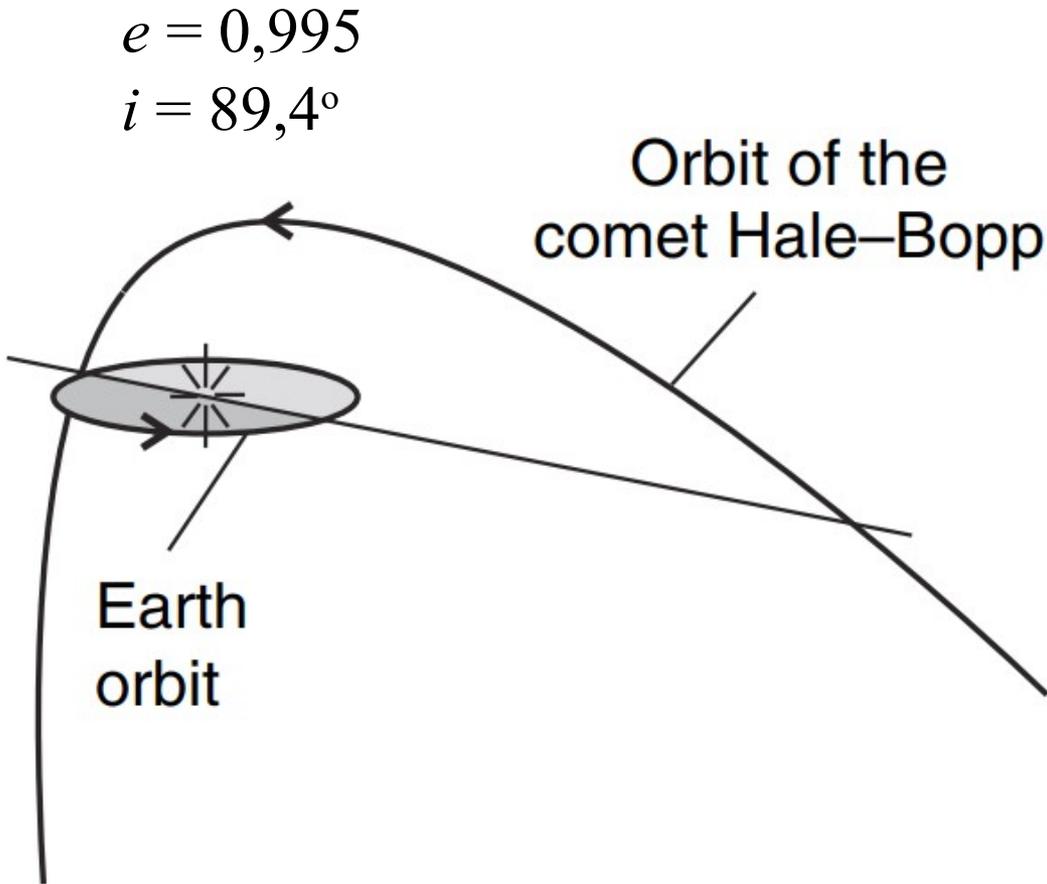


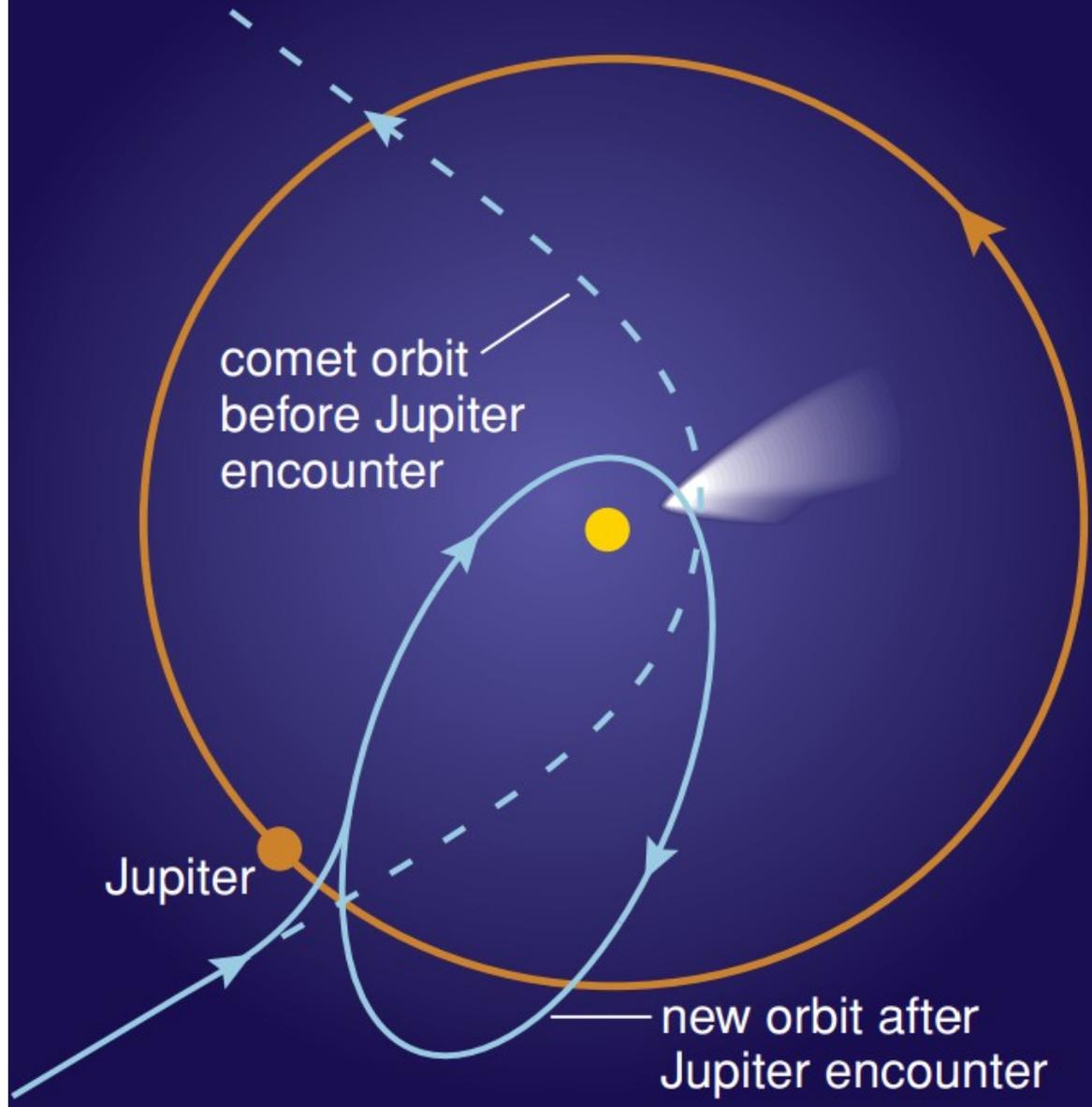
Figure 3.11 (a) The orbit of the long period comet Hale-Bopp in the inner Solar System.

(c) Discovering the Solar System

Órbitas de cometas podem mudar via intercâmbios de energia durante encontros gravitacionais.

A figura mostra um cometa em direção ao Sol. Ao passar perto de Júpiter, o cometa e Júpiter troquem energia.

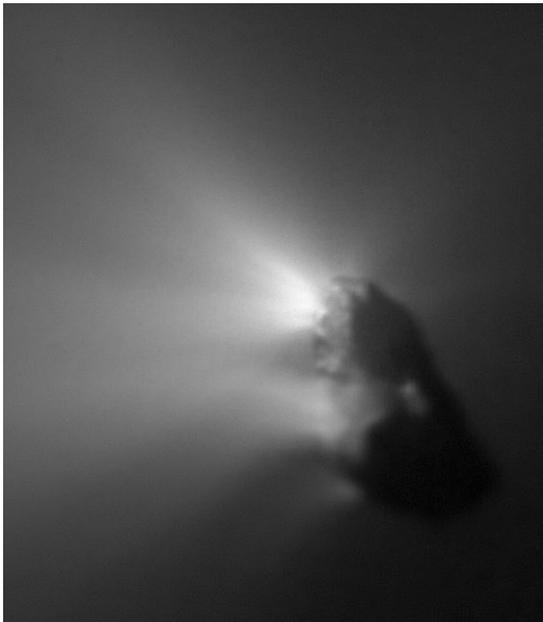
O cometa perde tanta energia orbital que sua órbita muda de não-ligada para ligada (elíptica), se transformando em um cometa da família de Júpiter



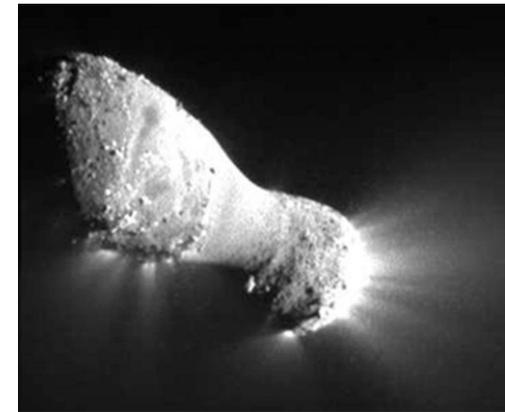
Ventos de cometas

- Ao se aproximar para o Sol (dentro de $\sim 5 - 10$ UA), os gelos do cometa se evaporam, deixando para trás um resíduo de grãos de poeira sem gelo, que vai criando uma crosta, acima dos grãos de poeira com gelo. Essa crosta é quebrada por ventos que expõem material para formar a coma e a cauda. Os ventos tendem a se ativar na parte de frente para o Sol, e desligam quando o cometa se afasta.

Cometa Halley, 8x15 km
ESA, 14/3/1986



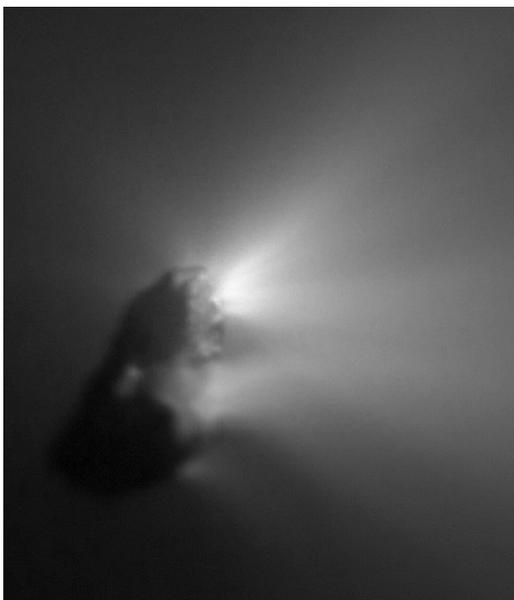
Cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko,
4x3x2 km. ESA/Rosetta, 10/9/2014



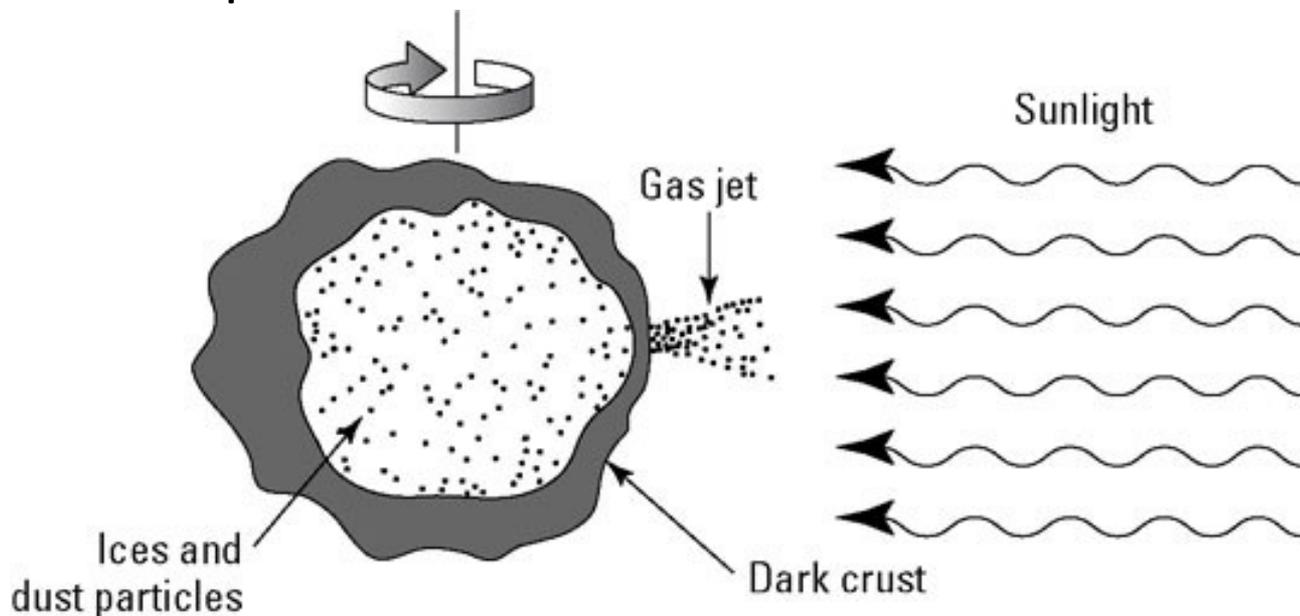
Cometa 103 P/Hartley,
0,7x 2,3 km
EPOXI / NASA, 3/11/2010

“Morte” de cometas

- O cometa pode “morrer”, no sentido de deixar de apresentar atividade e virar apenas uma rocha gelada, se perder o seu material volátil durante aproximações à região interna do Sistema Solar.
- Se o periélio for ~ 1 UA \rightarrow ~ 100 passagens de periélio podem evaporar o gelo do cometa, deixando-o com uma crosta tão espessa que o núcleo já não tem a capacidade de desenvolver coma e cauda.

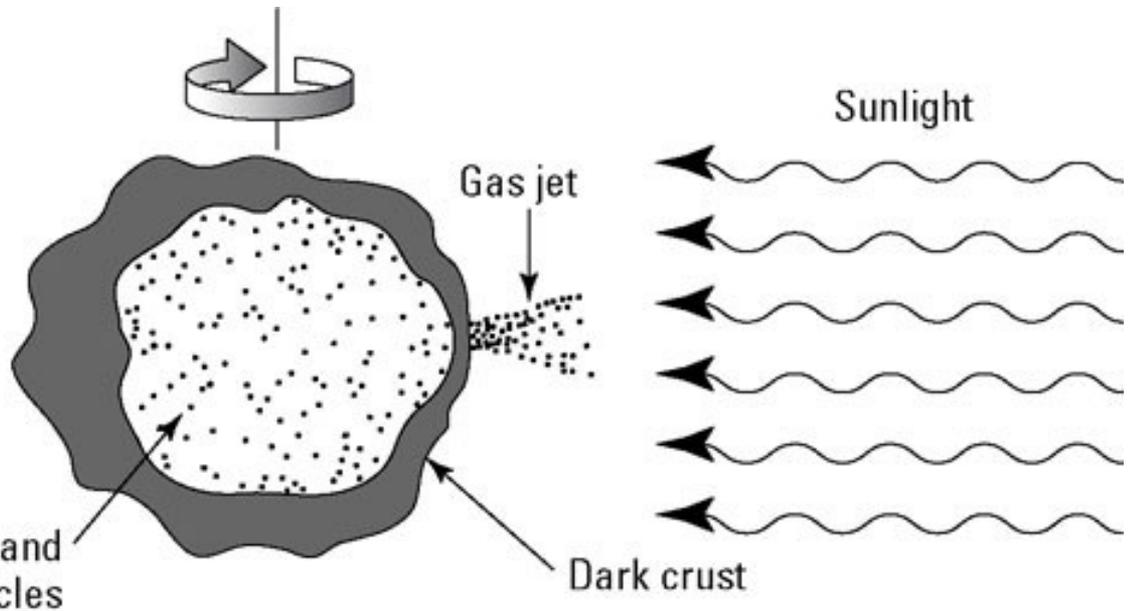
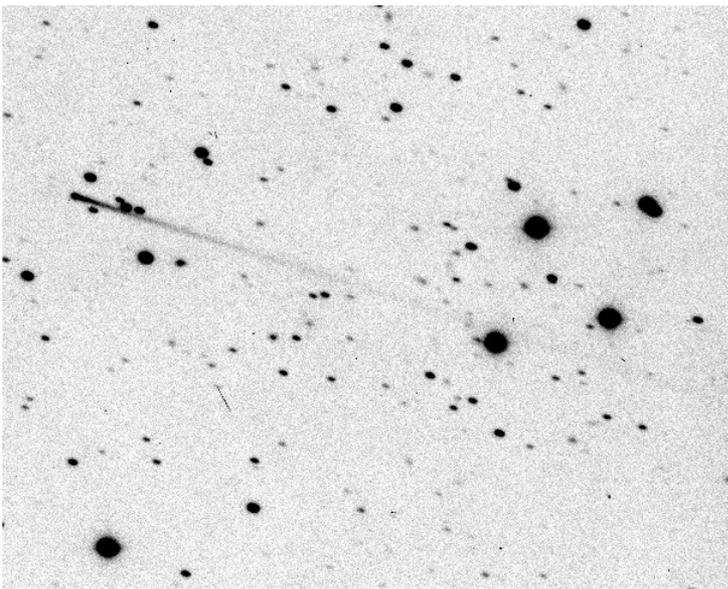


Núcleo do cometa Halley



“Morte” de cometas

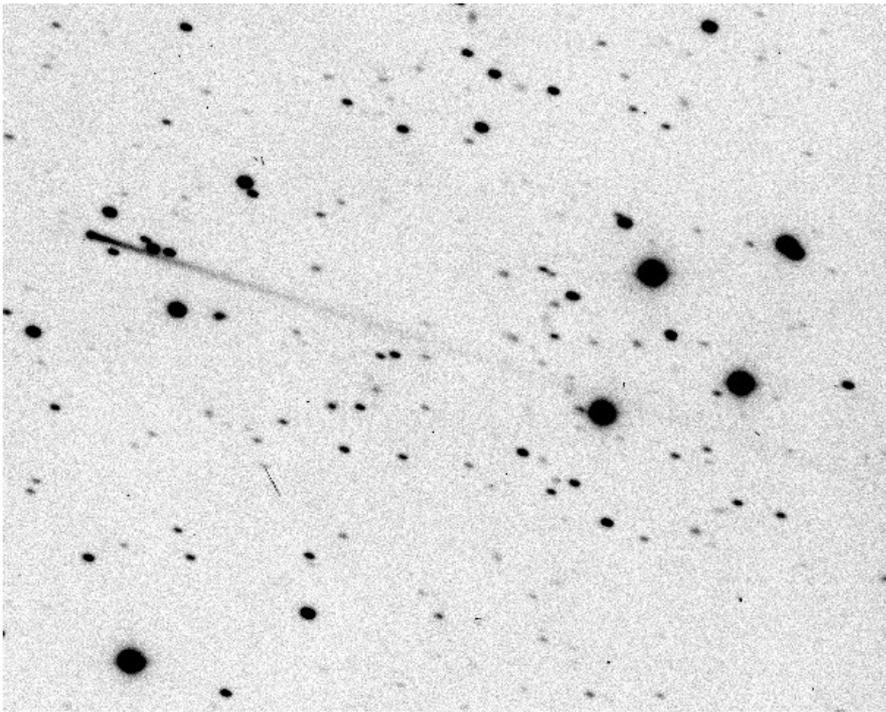
- Os cometas menores podem perder todo seu material volátil até o centro → cometa pode virar apenas restos de poeira.
- De acordo a modelos, a perda de voláteis em núcleos < 1 km, perdem o material volátil tão rapidamente que podem explodir.
- Em outros casos, a transição para poeira pode ser menos dramática
- Cometa Elst-Pizarro pode estar nas fases finais de atividade cometária



Asteroide/cometa 7968
Elst-Pizarro, 8/1996, ESO

Restos de cometas

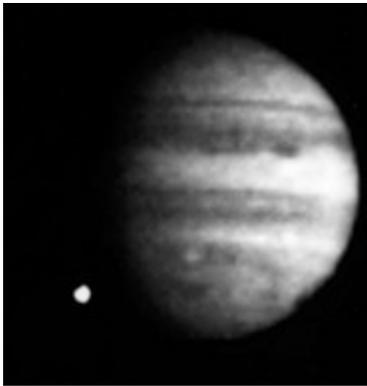
- O cometa Elst-Pizarro é considerado também um asteroide.
- Alguns asteroides, em particular da classe C e D, podem ser os restos de cometas que perderam seu material volátil
- Algumas luas de planetas gigantes, em particular aquelas com órbitas inusuais, podem ser remanescentes de cometa capturados



- Os núcleos de cometas não apenas perdem voláteis, mas também poeira, deixando um rastro de poeira nas suas órbitas

Asteroide/cometa 7968
Elst-Pizarro, 8/1996, ESO

- Cometas também morrem devido a colisões com planetas ou o Sol
- De 16 a 22/7/1994, fragmentos do cometa Shoemaker-Levy 9 colidiram com Júpiter



Sonda Galileo flagrou 1 dos impactos em 22/7/1994

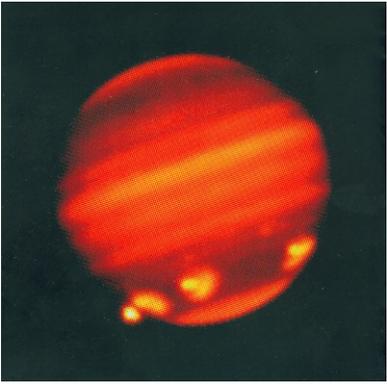
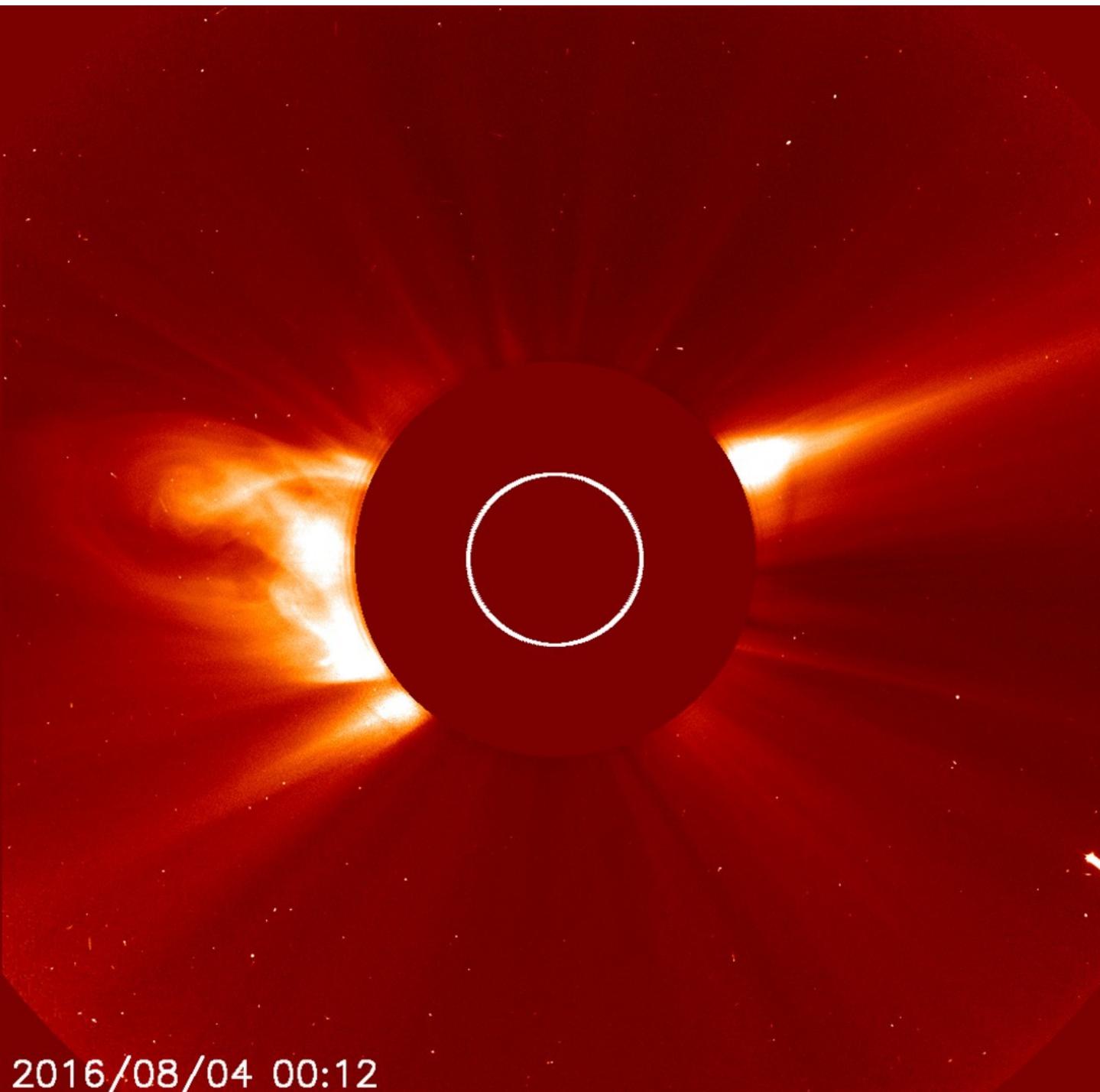


Imagem a partir de Calar Alto no infravermelho, no 20/7/1994, mostrando impacto e regiões quentes após impactos



Imagem composta (Hubble) de Júpiter e o cometa Shoemaker-Levy 9 em rumo de colisão

<https://solarsystem.nasa.gov/asteroids-comets-and-meteors/comets/p-shoemaker-levy-9/in-depth/>



Registro do observatório SOHO/NASA, de cometa rasante destruído em 4 de agosto de 2016, ao se aproximar demais ao Sol

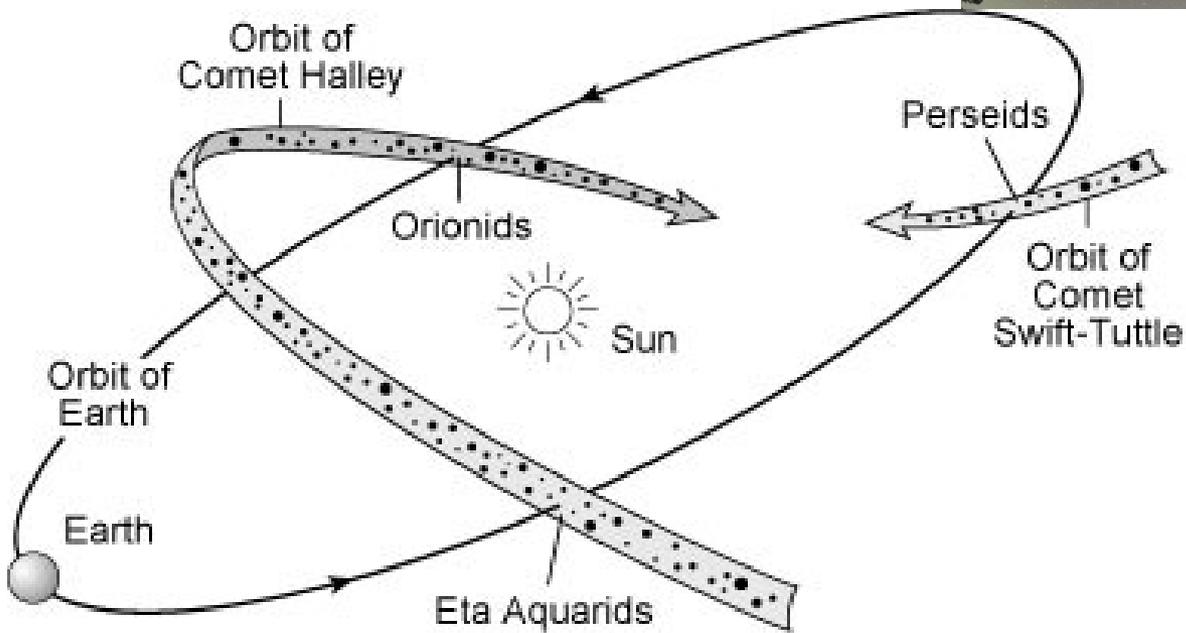
2016/08/04 00:12

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

(c) Steed Yu,
12/2015



Imagem composta de chuva de meteoros
Perseidas sobre a vila de Vrchteplá,
Eslováquia. (c) Petr Horálek 8/2016



As principais chuvas de meteoros

Table 9.1 *Major Annual Meteor Showers*

| Shower Name | Approximate Date | Associated Comet |
|-------------------------|--|---------------------------|
| Quadrantids | January 3 | ? comet C/1490 Y1? |
| Lyrids | April 22 | Thatcher |
| Eta Aquarids | May 5 | Halley |
| Southern Delta Aquarids | July 28 | ? 96P/Macholtz |
| Perseids | August 12 | Swift–Tuttle |
| Orionids | October 22 | Halley |
| Taurids | November 3 ^{Oct 11} Nov 12 | Encke |
| Leonids | November 17 | Tempel–Tuttle |
| Geminids | December 14 | Phaeton (Apollo asteroid) |
| Ursids | December 23 | Tuttle |

comet C/1490 Y1

= NEO (Amor) 2003 EH₁?

(cometa extinto observado em 1490?)

Objetos interestelares (cometas ou asteroides) visitantes do Sistema Solar

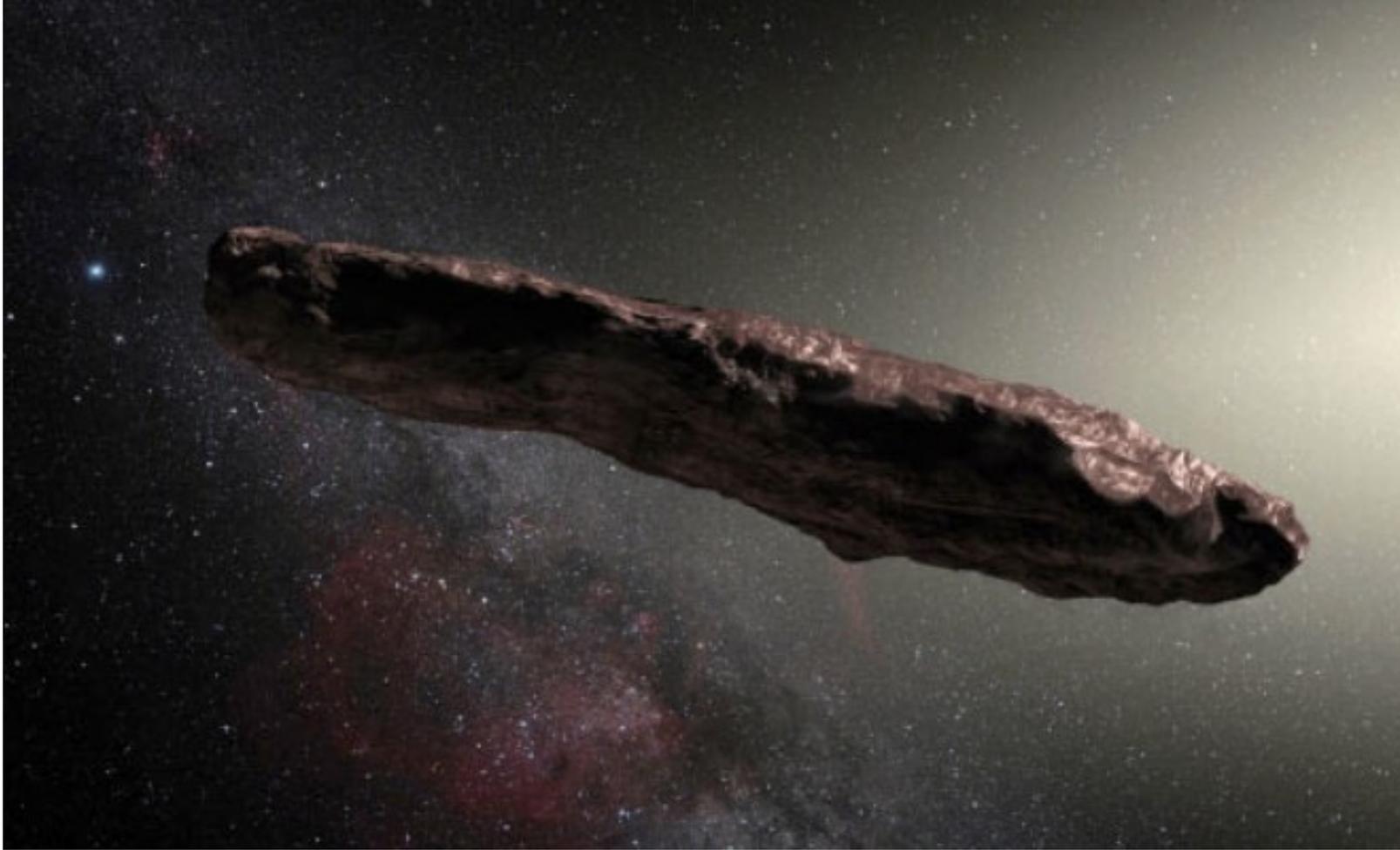


Imagem artística do cometa (ou asteroide) visitante interestelar
1I/Oumuamua

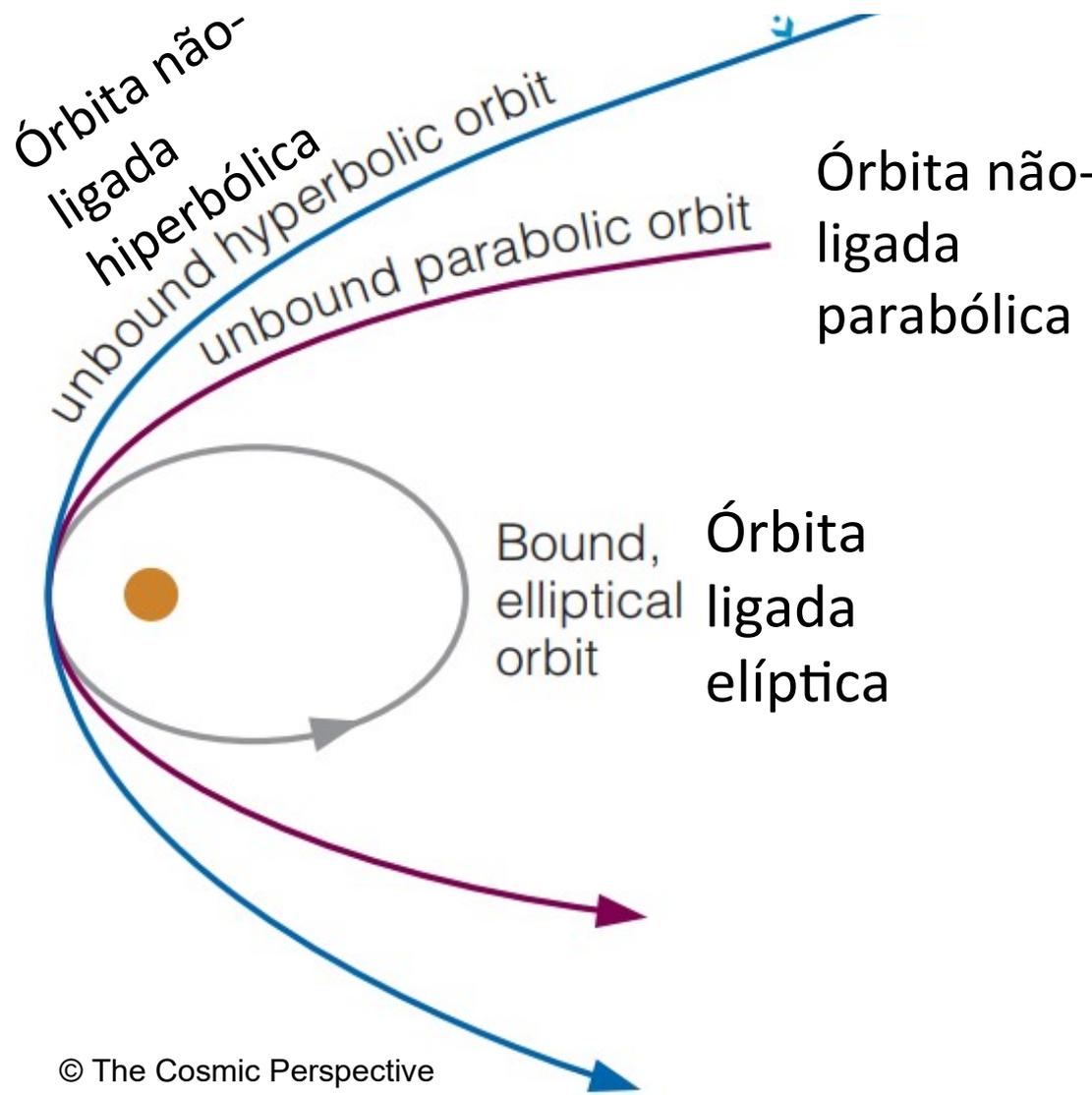
$0 \leq e < 1$ (elipse) $\Rightarrow E < 0$ (corpo gravitacionalmente preso)

$e = 1$ (parábola) $\Rightarrow E = 0$ (corpo gravitacionalmente solto)

$e > 1$ (hipérbole) $\Rightarrow E > 0$ (corpo gravitacionalmente ejetado)

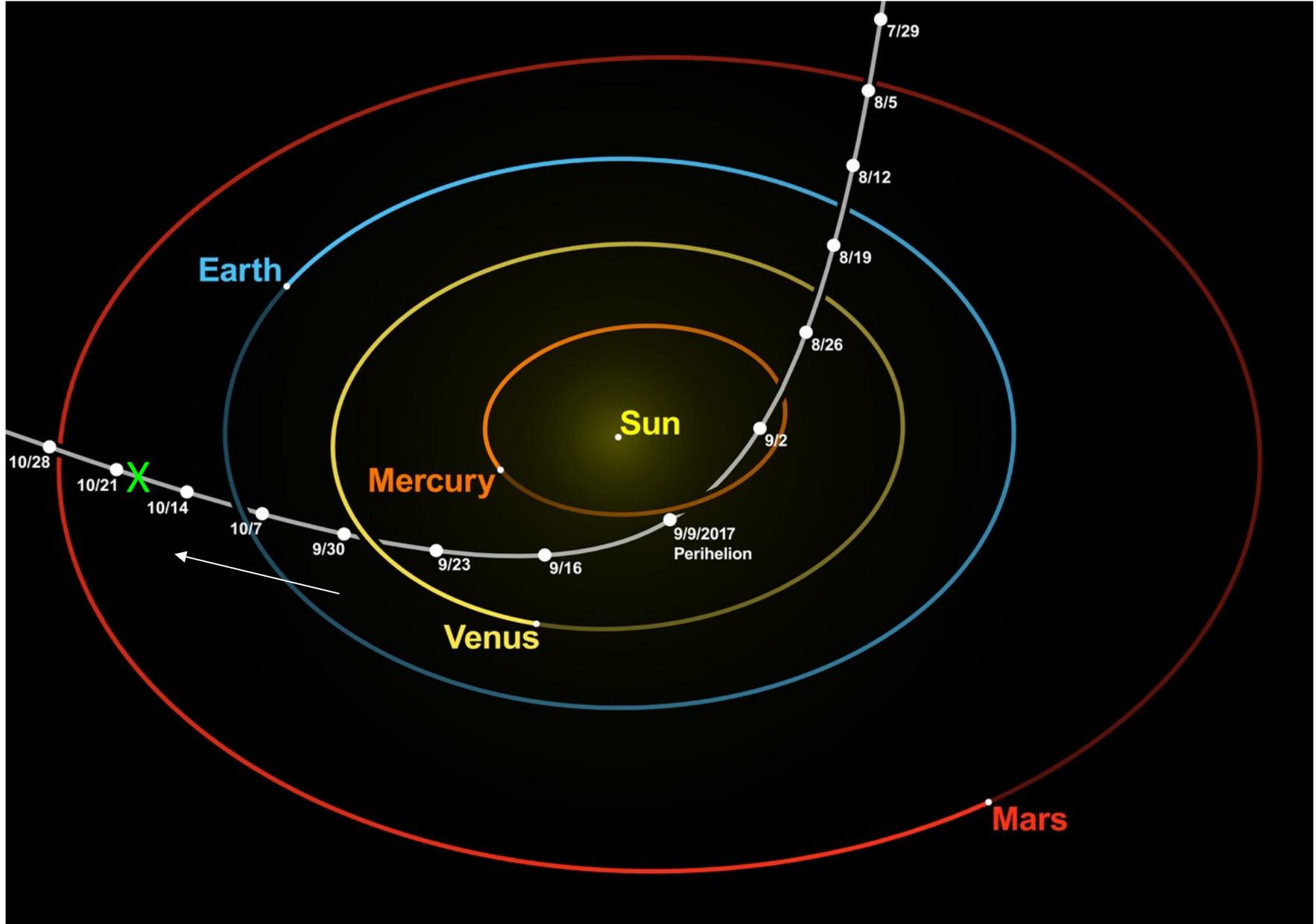
$$E = E_C(r) + E_P(r)$$

Órbitas com excentricidade significativamente maior que $e = 1$ (p.ex., $e = 1,2$) não são ligados ao Sistema Solar, mas de origem interestelar



Objeto Interestelar 1I/'Oumuamua: $e = 1,20$

A descoberta (19/10/2017) foi ~ 40 dias após passar pelo periélio



Primeiro asteroide/cometa interestelar: 1I/'Oumuamua

- Inicialmente classificado como cometa, mas após 1 semana foi classificado como asteroide, devido à ausência de coma.
- Atualmente não é classificado como cometa ou asteroide, apenas como objeto interestelar (nome 1I) pela alta excentricidade ($e = 1,20$)
- Apresentou aceleração talvez devido a jato cometário → pode ser o remanescente de um cometa, já quase sem atividade

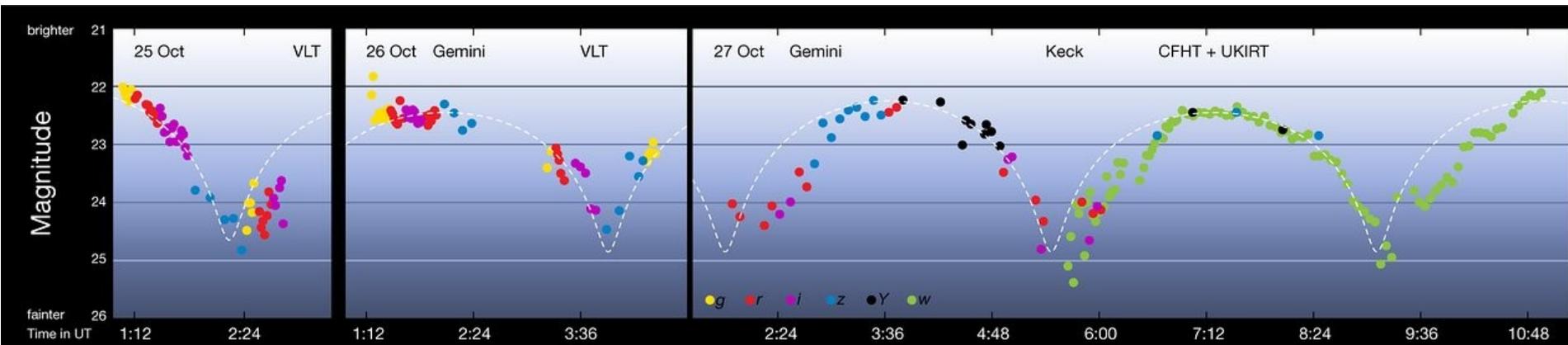


Oumuamua: em havaiano significa "um mensageiro de longe que chega primeiro"

Imagem artística do cometa (ou asteroide) visitante interestelar 1I/'Oumuamua

Grandes variações na curva de luz (2,5 mag)

→ objeto alongado



<https://www.eso.org/public/images/eso1737f/>

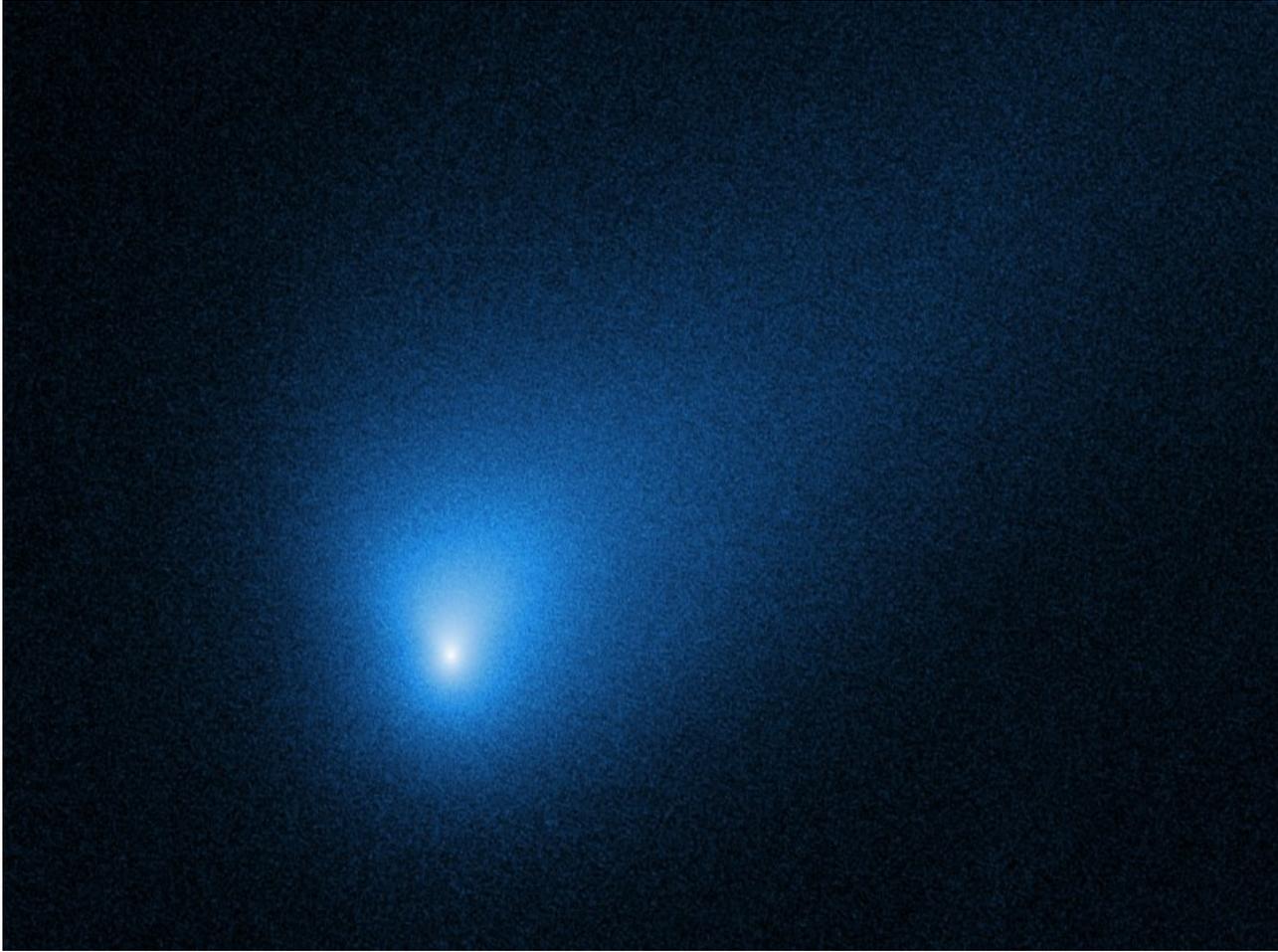
- Comprimento de 100 a 1000 m. Largura de 35 a 167 m



Razão comprimento:largura
entre 5:1 e 10:1 (talvez 6:1 ?)

Não temos estimativa exata,
talvez 230 x 35 x 35 m?

Cometa Interestelar 2I/Borisov: $e = 3,36$

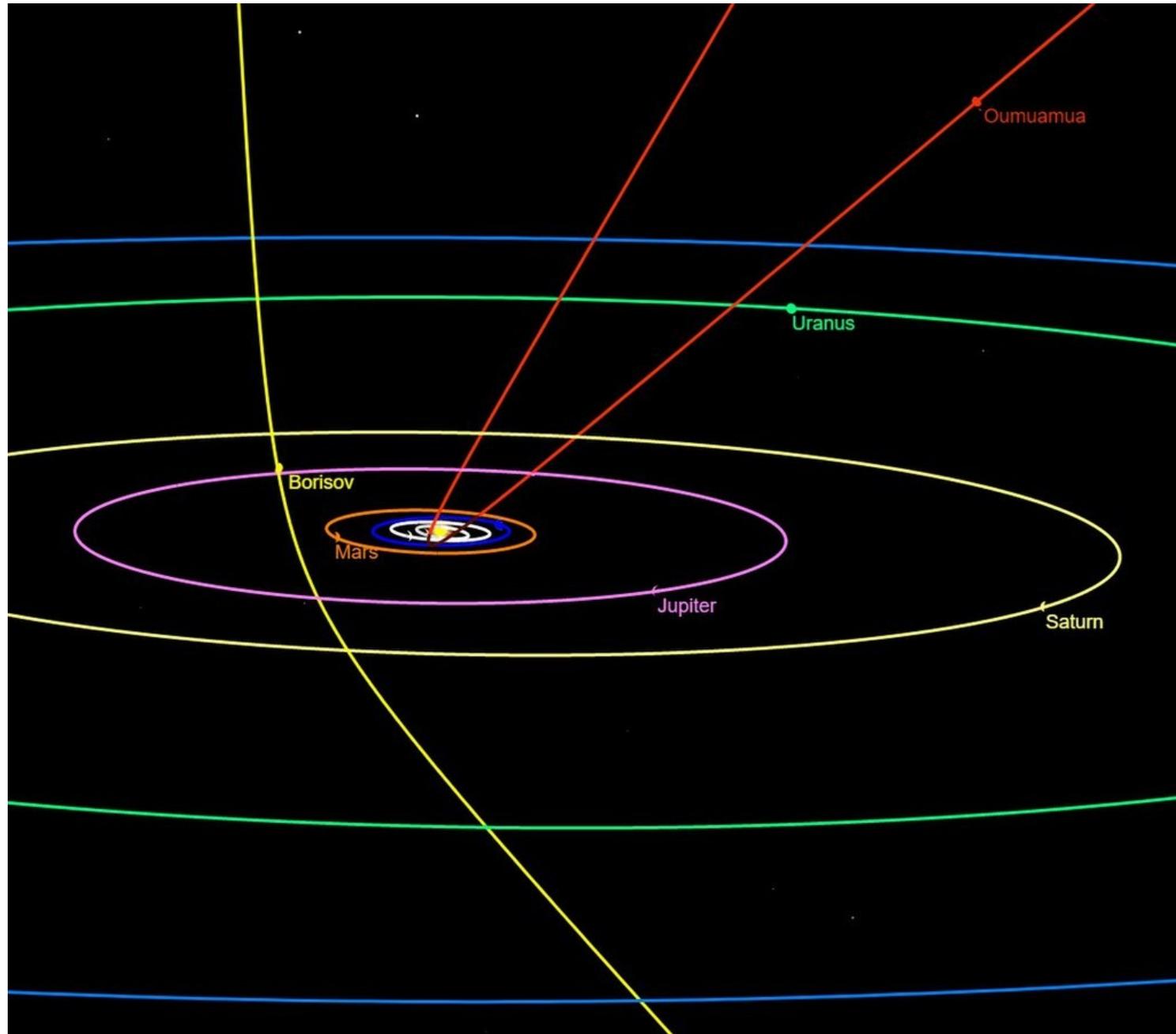


NASA's Hubble Space Telescope has given astronomers their best look yet at an interstellar visitor – comet 2I/Borisov – whose speed and trajectory indicate it has come from beyond our solar system. Hubble photographed the comet on October 12, 2019.

Órbitas dos objetos interestelares Borisov ($e = 3,4$) e Oumuamua

2I/Borisov foi descoberto pelo astrônomo amador Gennadiy Borisov (Crimeia) com um telescópio de 65 cm em 30/8/2019.

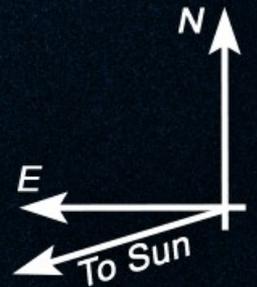
Periélio
8/12/2019
Perto da Terra
28/12/2019

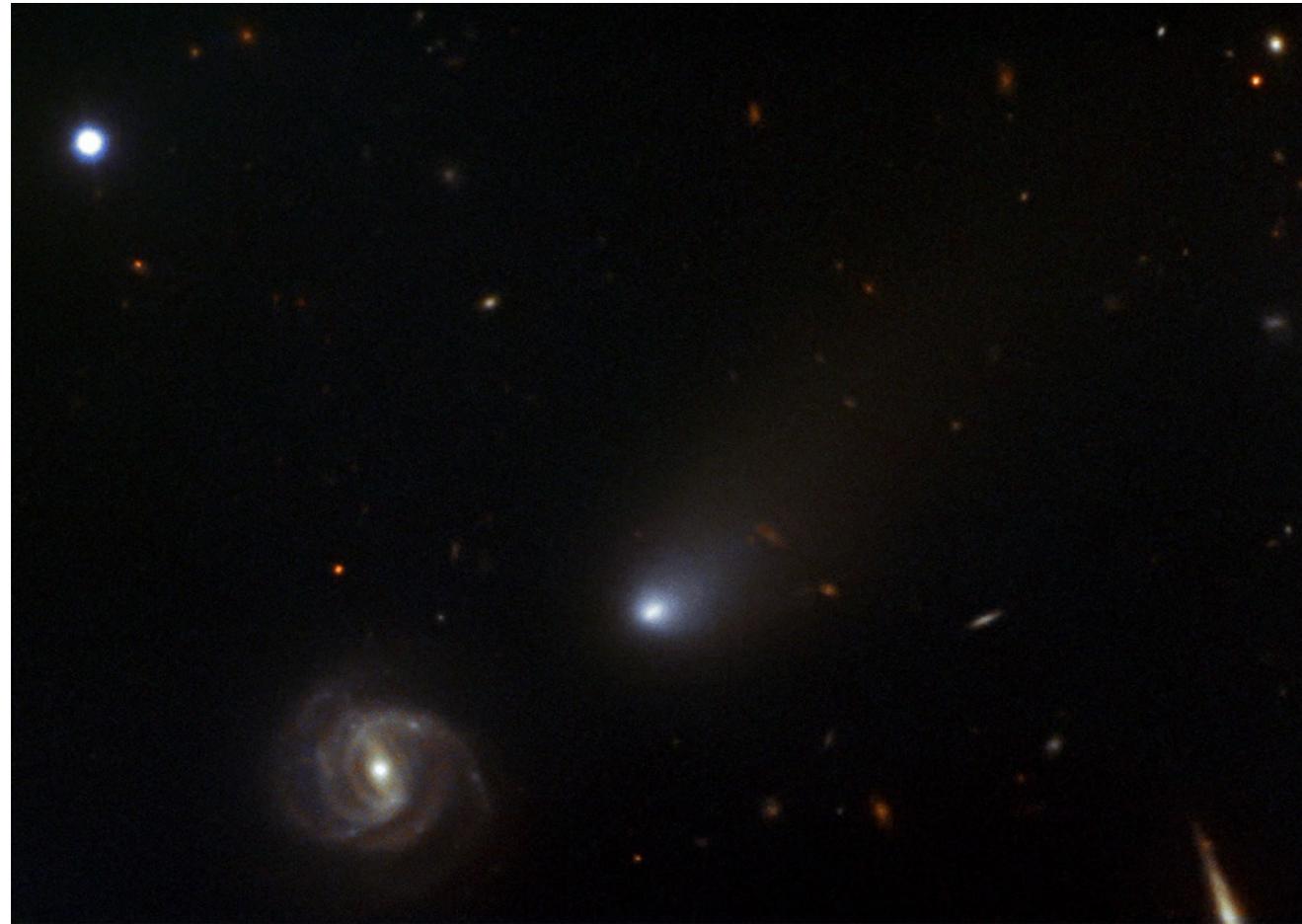


Cometa
interestelar
Borisov
observado
perto do
periélio
(8/12/2019)
pelo Hubble,
mostrando
coma
($\sim 10^4$ km) ao
redor do
núcleo
(tamanho \leq
0,4 km)

C/2019 Q4 (Borisov)
HST WFC3/UVIS F350LP
Dec. 9, 2019

9,000mi
14,500km 10''





Gemini North telescope image of the comet C/2019 Q4 (Comet Borisov) obtained on the night of November 11-12, 2019.

Vera Rubin (telescópio LSST), previsão 2023

8,4 metros de diâmetro

Câmera de 3,2 gigapixel

Localizado em Cerro Pachón (Chile)



Observar todo o céu visível a cada poucas noites.

LSST deve descobrir pelo menos 1 objeto interestelar por ano!

