Conceitos Fundamentais da Física do Sistema Solar (MPA5004) Enos Picazzio (IAGUSP)

COMETAS E OBJETOS TRANSNETUNIANOS

Fraser Gunn

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

The Great Comet McNaught observed from the southern hemisphere in January 2007

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!



Os cometas no cenário cósmico



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/2001 A2 (Linear)

C/1975 V1 (West)





Edmund Halley descobre a periodicidade dos cometas

mages/StarChild/learni center/people/Halley.gi gov/ http://starchild.gsfc.nasa.



Painting by Samuel Scott. 1759.

Edmond Halley: percebe que os cometas observados em 1682, em 1531 (por Petrus Apianus) e 1607 (por Johannes Kepler), tinham características orbitais semelhantes e período 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 Saturnos, 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.

- 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

Exemplos de novas designações:

| C/1995 Q2 (Hartley-Drinkwater) | |
|--------------------------------|---|
| P/1994 P1-A (Machholz 2) | Fragmento A de um cometa partido |
| P/1996 A1 (Jedicke) | Cometa periódico novo |
| 125P | Observação rotineira de um cometa periódico |

Periodicidade dos cometas

Cometas de longo período

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

Cometas de curto período (ou simplesmente Periódicos*)

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

- Órbitas próximas ao plano da eclíptica; inclinação menor que 30º (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 disponíves à observação



Qualquer teoria deve explicar:

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



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 10¹¹ 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.



http://web.gps.caltech.edu/classes/ge133/slides/lec21_16nov2011.ppt

Forças que podem perturbar cometas da Nuvem de Oort



web.gps.caltech.edu/classes/ge133/slides/lec21_16nov2011.ppt



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.



Comportamento em órbita



Brilho dos cometas

 $\Phi = f(\theta)$



- r heliocentric distance, Δ geocentric distance,
 Φ that is a function of phase angle; it is not well known, not the same for all comets (telescope aperture and sky brightness)
 n is called the photometric index of the comet,
- H observed magnitude
- H₀ "absolute" magnitude(observed magnitude the comet would have if placed at of 1 AU from both the Sun and the Earth)

$$H = H_0 + 5 \log \Delta + 2.5 n \log r, \qquad (5)$$

Since $\log \Delta$ is a known quantity we may put

 $H - 5 \log \Delta = H_{A}$ (Heliocentric magnitude) (6)

which represents the observed brightness of the comet reduced to the geocentric distance $\Delta = 1$. We have then

$$H_{A} = H_{0} + 2.5 n \log r,$$
 (7)

In the diagram H_{Δ} against log r the straight line (or its prolongation) derived from the least squares solution intersects the ordinate log r = 0 at a point corresponding to H_0 .

Title: On the Brightness of Comets **Authors:** Bobrovnikoff, N. T. **Journal:** Popular Astronomy, Vol. 50, p.473 **Bibliographic Code:** 1942PA.....50..473B

Brilho dos cometas

Title: Cometary Absolute Magnitudes, their Significance and Distribution Authors: Hughes, D. W.

Journal: Asteroids, comets, meteors III, Proceedings of a meeting (AMC 89) held at the Astronomical Observatory of the Uppsala University, June 12-16, 1989, Uppsala: Universitet, 1990, edited by C.I. Lagerkvist, H. Rickman, and B.A. Lindblad., p.327 Bibliographic Code: 1990acm..proc..327H

Fig. 3. The inner solar system heliocentric apparent magnitude, $(m_1 - 5 \log \Delta)$ of P/Halley is plotted as a function of the logarithm of the heliocentric distance, r AU, for the last four apparitions. The values of the pre and post-perihelion absolute magnitudes are marked at the points where the graphs intersect the $\log r = 0.0$ ordinate and the values for the activity indices are written above the lines.



Brilho dos cometas



http://www.sunflowercosmos.org/solar_system/comet_images/comet_structure.jpg

Núcleo

- Aglomerado compacto de material rochoso (meteorítico) e gelos diversos.
- Zamanho 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.



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 móleculas de gás absorvem energia, e a reemitem em forma de luz visível
- Espécie ionizadas mais frequentes:
 CO⁺, N₂⁺, CO₂⁺, CH⁺



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.







Pressão de Radiação: força por unidade de área exercida pela radiação eletromagnética, dada por:

$$P = \frac{F}{A} = \frac{dp}{Adt} = \frac{dE}{Acdt} = \frac{1}{c}\Phi_E, \qquad p = F.t \ e \ E = p.c$$

com: *p* - momentum,

c - velocidade da luz,

 Φ_E - fluxo de energia (energia/área x tempo)

Para partículas relativísticas, a pressão de radiação *P* está relacionada com a densidade de radiação *u* através de:

$$P = \frac{1}{3}u = \frac{1}{3}aT^4,$$

com: *a* - cte de radiação [$a = \frac{4\sigma}{c} = \frac{8\pi^5 k^4}{15c^3h^3} = 7.5657 \times 10^{-15} \text{ erg cm}^{-3} \text{ K}^{-4}$] *T* - temperatura.

No Sistema Solar, a pressão de radiação empurra para longe do Sol partículas com tamanhos da \sim 0,1 μ m

Estrutura dos cometas: poeria

O fóton carrega momentum:

$$p = E/c$$

Momentum e força se relacionam:

$$F = dp/dt$$

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

A força exercida pelos fótons em um grão de raio R é "pressão x seção geométrica"

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

http://burro.astr.cwru.edu/Academics/Astr221/SolarSys/Comets/tails.htm

O força gravitacional atrativa do Sol sobre o grão é:

$$F_{grav} \!=\! \frac{GM_{\bigodot}M_{g}}{r^{2}} \!=\! \left(\frac{GM_{\bigodot}}{r^{2}}\right) \left(\frac{4}{3}\pi R^{3}\rho_{g}\right) \!=\! \frac{4\pi R^{3}GM_{\bigodot}\rho_{g}}{3r^{2}}$$

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

$$\begin{split} F_{rad} = & F_{grav} \\ \frac{L_{\bigodot} R^2}{4r^2c} = & \frac{4\pi R^3 G M_{\bigodot} \rho}{3r^2} \ \Box \searrow \ R = & \frac{3L_{\bigodot}}{16\pi G M_{\bigodot} \rho_{g}c} \simeq 0,006 \ \mathrm{cm} \end{split}$$

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



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

Tempestade solar interage com cauda ionizada



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

Tempestade solar interage com cauda ionizada

NASA's STEREO satellite - 20/04/2007



Causa possível:

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



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. Nation







Composição



Composição básica:

80% água, 16% CO, 4% CO₂, e traços de amônia e metano



Picazzio, de Almeida, Andrievskii, Churyumov, Lukyanyk: Proceedings ACM2002, ESA: SP: 2002 ut/2011











A visão tradicional da formação de cometas propõe que os materiais das partes mais afastadas da nebulosa solar primitiva se agregaram em componentes maiores, enquanto orbitavam o proto-Sol (antes de ser uma estrela). Processo: (a) o grão de poeira interestelar é composto de núcleos de silicato amorfo e uma matriz de moléculas orgânicas (já presente na nebulosa solar que colapsou); (b) muitos desses grãos adquirem cobertura de gelo; (c) gradativamente eles crescem como partículas de poeira tipo-fractal, através de colisão e colagem; (d) essa agregação de partículas eventualmente produz cometésimos; (e) esses cometésimos continuam crescendo; (f) até formarem um objeto com as dimensões de um cometa. (*American Scientist 89*)

Constituição dos grãos



http://web.gps.caltech.edu/classes/ge133/slides/lec21_16nov2011.ppt

 $1 \mu m$

U2012C-1I 1.8 g/ee 19 km/s
Poeira interestelar

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



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

Química da coma

THE COMA

Molecules are liberated from the nucleus by solar heating and sublimation



Molecules are destroyed by photodissociation & photoionization

 $\begin{array}{ccc} H_2O + hv & \longrightarrow & H + OH \\ OH & + hv & \longrightarrow & H + O \end{array}$

 $H_2O + hv \longrightarrow H_2O^+ + e^-$

Nucleus molecules are referred to as the "parent molecules"

The fragments produced by the absorption of a photon are called "daughters" S. Charnley

Composição química

Composição química dos cometas

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



Bockelee-Morvan, Crovisier, Mumma, and Weaver (Comets II, 2003)

Composição

| Species | Comets | ISM |
|-------------------------------|----------------------|-------|
| H₂O | 100 | 100 |
| со | 1-30 or more | 5-50 |
| CO2 | 3-6 or larger (?) | 12-32 |
| H₂CO | 0.1-1 | 1.7-7 |
| CH₃OH | 1-7 | 0-25 |
| нсоон | 0.05 | 0.4-3 |
| HNCO | 0.1 | |
| CH ₄ | 0.1-0.8 | 1-2 |
| C ₂ H ₂ | 0.1-0.3 | |
| C ₂ H ₆ | 0.1-0.6 | < 0.4 |
| NH ₃ | 0.6 | <6-15 |
| HCN | 0.1-0.3 | < 3 |
| CH ₃ CN | 0.02 | |
| HC ₃ N | 0.03 | |
| NH CHO | 0.01 | |

Composição química: cometas x meio interestelar (ISM)



From: Meeck 2006, quoting Irvine et al 2000 (PPIV); Mumma et al (2005); Cat; Ehrenfreund et al., Bockelee-Morvanet al. (2004)

Composição

| | HH46 | W33A | HB |
|-------------------|-------|------|-----|
| Water | 100 | 100 | 100 |
| CO | 20 | 1 | 23 |
| CO ₂ | 30 | 3 | 6 |
| CH ₄ | 4 | 0.7 | 0.6 |
| H ₂ CO | • • • | 2 | 1 |
| CH₃OH | 7 | 10 | 2 |
| HCOOH | 2 | 0.5 | 0.1 |
| NH ₃ | 9 | 4 | 0.7 |
| OCS | ••• | 0.05 | 0.4 |



HH46 – Herbig-Haro W33A – protoestrela (Sagitário) HB - C/1995 O1 (Hale-Bopp)

http://web.gps.caltech.edu/classes/ge133/slides/lec21_16nov2011.ppt

8

9

Molecular inventory

.....

-

-

6

C₅H

I-H2CA

C2H4

CH₃CN

CH3NC

CH₃OH

CHaSH

HC₃NH⁺

HC2CHO

NH2CHO C₅N

7

C₆H

CH2CHCN

CH₃C₂H

HCOCH_a

NH₂CH₃

C-C2H4O

CH₂CHOH

HC₅N

| 4 | Participation. | | |
|-----------------|------------------|--------------------|---------------------------------|
| H ₂ | C ₃ | c-C ₃ H | C ₅ |
| AIF | C ₂ H | I-C ₃ H | C ₄ H |
| AICI | C20 | C ₃ N | C ₄ Si |
| C ₂ | C ₂ S | C ₃ O | I-C ₃ H ₂ |
| CH | CH ₂ | C ₃ S | c-C3H2 |
| CH⁺ | HCN | C_2H_2 | CH ₂ CN |
| CN | нсо | $CH_2D^*?$ | CH4 |
| CO | HCO+ | HCCN | HC ₃ N |
| CO ⁺ | HCS ⁺ | HCNH* | HC2NC |
| CP | HOC+ | HNCO | нсоон |
| CSi | H ₂ 0 | HNCS | H ₂ CHN |
| HCI | H ₂ S | HOCO* | H_2C_2O |
| KCI | HNC | H ₂ CO | H ₂ NCN |
| NH | HNO | H ₂ CN | HNC ₃ |
| NO | MgCN | H ₂ CS | SiH4 |
| NS | MgNC | H ₃ O* | H ₂ COH ⁺ |
| NaCl | N_2H^+ | NH ₃ | |
| он | N20 | SiC ₃ | |
| PN | NaCN | CH ₃ | |
| SO | OCS | | |
| SO* | SO ₂ | | |
| SIN | c-SiC2 | | |
| SIO | CO ₂ | | |
| SIS | NH ₂ | | |
| CS | H ₃ * | | |
| HF | SICN | | |
| SH | AINC | NOST NA | S. Sugar |
| FeO? | H_2O^+ | | |
| SiH | | | BRANN PR |

| CH ₃ C ₄ H | CH3C5N? | HC ₉ N | C ₆ H ₆ | HC11N |
|------------------------------------|--|--|---|--|
| CH3CH2CN | (CH3)2CO | | 1200 | |
| (CH ₃) ₂ O | HOCH2CH | 2OH | | |
| CH ₃ CH ₂ OH | NH2CH2CC | юн | | |
| HC7N | | | See See | |
| C ₈ H | | | 1.1.1.1 | Card and a second |
| | | | | |
| | CH_3C_4H CH_3CH_2CN $(CH_3)_2O$ CH_3CH_2OH HC_7N C_8H | $\begin{array}{ccc} CH_3C_4H & CH_3C_5N? \\ CH_3CH_2CN & (CH_3)_2CO \\ (CH_3)_2O & HOCH_2CH_2 \\ CH_3CH_2OH & NH_2CH_2CO \\ HC_7N \\ C_8H \end{array}$ | $\begin{array}{cccc} CH_3C_4H & CH_3C_5N? & HC_9N \\ CH_3CH_2CN & (CH_3)_2CO \\ (CH_3)_2O & HOCH_2CH_2OH \\ CH_3CH_2OH & NH_2CH_2COOH \\ HC_7N \\ C_8H \end{array}$ | $\begin{array}{cccc} CH_3C_4H & CH_3C_5N? & HC_9N & C_8H_6 \\ CH_3CH_2CN & (CH_3)_2CO \\ (CH_3)_2O & HOCH_2CH_2OH \\ CH_3CH_2OH & NH_2CH_2COOH \\ HC_7N & \\ C_8H \end{array}$ |

10

11

12 13

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 blochemistry, 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 cyanopolyyne series cyanoacetylene (HC₃N) - is ubiquitous in molecular clouds, and another member - cyanodecapentayne (HC11N) - is the largest molecule that has been unambiguously identified in the interstellar medium. A few small ring molecules are present in the list but many larger organic compounds await detection in space. The present authors, for example, are currently using the Arizona Radio Observatory 12 m and Green Bank telescopes to search for ring compounds (PAHs) containing nitrogen. Table courtesy of Al Wootten and updated from www.astrochemistry.net.



where

- Q gas production rate
- K_T thermal conductivity
- L_s latent heat of sublimation per mole
- ε_{ir} infrared emissivity
- τ optical depth of the coma
- *T* temperature of the surface

Produção gasosa



http://web.gps.caltech.edu/classes/ge133/slides/lec21_16nov2011.ppt

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



19P/Borrelly [Deep Space 1 1999] visita asteróide 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 5 km

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]

10. registro in loco da atividade
Pouso em nov/2014.
Registro até dez/2015.
Período ~6,6 a.
Tamanho: 4 km



o núcleo do 1/P Halley

Imagem composta de 60 exposições obtidas pela sonda européia 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)



o núcleo do 19/P Borrelly



© A.Kammerer

O núcleo do cometa 81P/ Wild 2



Copyright 2004 by Kari A. Kuure



Tamanho: ~ 5 km Y Kari A. Kuute Aparência à 500 km de distância



(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



Semelhanças na forma



De fato, o que deve ser um cometa?



23/08/2014

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

3 km x 5 km; Missão Rosetta













Ν

500m





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

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

LUZ





a poeira do cometa 81P/ Wild 2





GEMS? (Glass with Embedded Metal and Sulfides)





SEM-EDS X-ray Maps: overlay maps

> "Easter" C054.4.25.0 potted butt in acrylic



BSE image, 4.0 kV, high contrast





EDS X-ray maps, 10 kV



Camadas finas

Camadas espessas

Terreno plano

Terreno escarpado



o núcleo do 9/P Tempel 1

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





visão do módulo de vôo







Imagem realçada da coma



Alguns jatos parecem provir de regiões que estão na face invisível do núcleo.

As linhas:

vermelhas indicam o centro dos jatos amarelas seus respectivos limites azuis representam os limites das sombras

NASA/UM/Tony Farnham

Cometa 9/P Tempel 1



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

Modelos de espectro baseados em compostos minerais e gelos são representados pelas curvas coloridas. Espectro final ajustado é mostrado em laranja pontilhado. Silicatos dominam a emissão observada. NASA/UM C. M. Lisse et al., *Science* 313, 635 (2006); published online 13 July 2006 (10.1126/science.1124694). Emissão térmica comparada



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

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

Poeira

Cometary Dust



http://web.gps.caltech.edu/classes/ge133/slides/lec21_16nov2011.ppt

Poeira





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

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

Vermelho: espectro apresentado 0,7 s antes do impacto



Espectro de gelo superficial





Espectro do H₂O e do CO₂





A <u>longitude</u> aumenta na direção da rotação da mão direita (convenção da IAU). O meridiano primário é definido como

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

NASA/UM/Cornell/Peter Thomas and Tony Farnham

Origem da água na Terra



Image credit: NASA/JPL-Caltech

Água na Terra e perda

| Local | Volume (km3) | Percentual do total (%) |
|-------------------------------|-----------------|----------------------------|
| Oceanos | 1.370.000 | 97,61 |
| Calotas polares e geleiras | 29.000 | 2,08 |
| Água subterrânea | 4.000 | 0,29 |
| Água doce de lagos | 125 | 0,009 |
| Água salgada de lagos | 104 | 0,008 |
| Água misturada no solo | 67 | 0,005 |
| Rios | 1,2 | 0,00009 |
| Vapor d'água na atmosfera | 14 | 0,0009 |
| Biosfera | 6 | 0,00004 |

Fonte: R.G.Wetzel, 1986

Fotodissociação da água:



Estimativas apontam para uma perda

de 5×10⁵ ton / ano.

- Nos últimos 4 bilhões de anos a perda foi cerca de 2×10¹⁵ ton, ou 0,2 % do conteúdo atual dos oceanos.
 - Vulcanismo ainda libera vapor de água.
Razão Deutério / Hidrogênio

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

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



Razão Deutério / Hidrogênio



http://web.gps.caltech.edu/classes/ge133/slides/lec21_16nov2011.ppt

| Object | Species | \mathbf{D}/\mathbf{H} | Reference |
|-----------------------|------------------|-------------------------|-----------|
| , | _ | ×10 ⁻⁴ | |
| Earth (VSMOW) | H ₂ O | 1.558 ± 0.001 | 33 |
| 103P/Hartley 2 | H_2O | 1.61 ± 0.24 | this work |
| 1P/Halley | H_2O | 3.06 ± 0.34 | 34 |
| C/1996 B2 (Hyakutake) | H_2O | 2.90 ± 1.00 | 35 |
| C/1995 O1 (Hale-Bopp) | H_2O | 3.3 ± 0.8 | 36 |
| 153P/Ikeya-Zhang | H_2O | < 2.50 | 37 |
| C/2002 T7 (LINEAR) | H_2O | 2.5 ± 0.7 | 38 |
| 8P/Tuttle | H_2O | 4.09 ± 1.45 | 39 |
| Enceladus | H_2O | 2.5 + 1.5 - 0.7 | 40 |
| CI chondrites | H_2O | 1.70 ± 0.10 | 41 |
| Protosolar | H_2 | 0.21 ± 0.04 | 15 |
| Interstellar medium | Н | 0.16 ± 0.01 | 15 |
| Jupiter | H_2 | 0.225 ± 0.035 | 42 |
| Saturn | H_2 | 0.17 + 0.075 - 0.045 | 42 |
| Uranus | H_2 | 0.55 + 0.35 - 0.15 | 43 |
| Neptune | H_2 | 0.45 ± 0.1 | 44 |

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

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.

Água trazida por cometas



¿Cuántos cometas?



Oceano 0.023% = 1.37×10^{21} kg Total ~ 0.05-0.1% = (2.9-59) $\times 10^{21}$ kg

Comet Tempel 1- 8 x 1013 kg20 millónesComet Hale Bopp (40 km radius)-1.3 x 1017 kg-10,000Cometas rasantes co el Sol-1-3 x 1018 kg< 100 para el agua de la Tierra</td>



•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.





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

C/1996 B2 (Hyakutake)



Cometas Hyakutake e NEAT

Cometa C/2002 V1 (NEAT)



Cometas rasantes

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

Caso típico é este cometa que surge repentimanente 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 $1.165.00 \text{ km} (1,7 \text{ R}_{\odot})$ acima da fotosfera.



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 períélica, ou às eventuais reações químicas explosivas de seus voláteis.



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

Fragmentação: cometa P/Shoemaker-Levy 9

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

W. M. KECK TELESCOPE CAPTURES THE IMPACT OF COMET SHOEMAKER-LEVY 9 FRAGMENT-R ON JUPITER

> 5:30 UT, July 21, 1994 MAUNA KEA, HAWAII

Astronomiers: Imkeide Pater, James R. Graham, Garrett Jernigan University of California, Berkeley

with support from Wendy Harrison, Joel Aycock, David Vezie and the staff of the Keck Observatory



(16-22/7/1994)

•Com excessão 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, tranformando-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.

Região Transnetuniana



Região Transnetuniana

WHY "KUIPER" BELT?

The Kuiper Belt Gerard Kuiper (it is pronounced like "Viper" [thanks, Maaike] although a lot of people try it as "Coyper", for reasons which remain unclear) was an astronomer interested in the solar system at a time when this interest was even less fashionable than it is today. He wrote a paper including a mention of objects beyond Pluto (note: not Neptune) in 1951 and the Kuiper Belt is so-called because of this paper. The reference is G. P. Kuiper 1951, in Astrophysics: A Topical Symposium, ed. J. A. Hynek, New York: McGraw-Hill.

The problem with Kuiper Belt is that Kuiper did not, by any objective reading, really predict the object to which his name is given. Kuiper's paper refers to a primordial set of bodies that he supposed were scattered out to the Oort Cloud by massive Pluto, so that if taken at face value his paper predicts there should be nothing where we now see Kuiper Belt Objects. Kuiper in fact anti-predicted what we now call the Kuiper Belt. We now know that Pluto is tiny and has too little mass to eject objects to the Oort Cloud.

The Edgeworth Belt Kenneth Edgeworth wrote papers about objects beyond Pluto in 1943 and 1949. His work was not cited by Kuiper, presumably because he had overlooked it (although one sometimes hears dark rumors that Kuiper chose to ignore Edgeworth's prior work). See K. E. Edgeworth 1943, J.B.A.A. 53, 186.

Edgeworth's papers were, in some ways, closer to the belt of objects observed beyond Neptune, although the relevant parts amount to barely a paragraph. At least he didn't anti-predict the belt. His work, though, is not quantitative and he makes no important predictions about these objects so that some say it is just a conjecture, not really a theory based on understanding. In fact, his paper contains remarks that don't even translate well across the intervening 60 years. What exactly are those "clusters" he's writing about? If he were alive, I'd have to ask him what he was trying to say.

The Leonard Belt Worse, for both Kuiper and Edgeworth, is the recent finding that Fred Leonard of UCLA mentioned in print the possibility of trans-Plutonian objects as early as 1930 (the reference is suitably obscure: Leaflet Astron. Soc. Pacific No. 30, pp. 121-124).

The Name Game Presumably, the intent should be to do the right thing by attributing credit where it's due. Unfortunately, it's not clear to me where, if anywhere, proper credit is due. Just hand-waving on the possibility that there might be something "beyond Pluto" is not sufficient. Some of the above seem a bit like the predictions of Nostradamus: read into them what you will. If anything, I would say that J. Fernandez most nearly deserves the credit for predicting the Kuiper Belt based on clear statements and physical reasoning. His 1980 paper (Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 192, 481-491) is worth a careful read.

The Name Game is not new in science: we associate Darwin with evolution much more than we associate it with Alfred Wallace (although Wallace, who worked independently of Darwin, was ready to go public with the idea before him). There's even a name for it: Stigler's Law asserts that "No scientific discovery is named after its original discoverer". This is obviously too strong a statement, but it captures a truthful essence (and has lead to the inevitable claim that Stigler's Law was in fact discovered by someone else, long before Stigler wrote about it. So there).

The Logical Alternative Call them "trans-Neptunian" objects.

http://www2.ess.ucla.edu/~jewitt/kb/gerard.html

Cometas, Objetos do Cinturão de Kuiper (KBO) e Nuvem Oort



Cometas, Objetos do Cinturão de Kuiper (KBO) e Nuvem Oort



Objetos do grupo Centauro

CHARIKLO:

- -Descoberto em 1997, através de eclipse por seus anéis
- -É o maior objeto conhecido da classe "Centauros",
- Conhecemos entre 400 e 500 deles
- Eles orbitam o Sol entre Júpiter e Netuno.



RETRATO ESPACIAL

Descobertas de asteroide com anéis (Chariklo) e de mais um planetoide distante (2012 VP) mudam a configuração do sistema solar



Objetos do grupo Centauro

- Órbitas entre Júpiter e Neptune
 - Essas órbitas não são estáveis
- Conhecemos pelos menos 3 casos em que aparecem "coma"
- É possível que sejam provenientes do grupo KBO
- Espectro de Refletância:
 - Carbono Amorfo
 - Hidrocarbonetos
 - Metanol congelado



Objetos do grupo Centauro



Para um grande número de objectos com diferentes massas (asteroides, crateras de impacto, cometas estrelas etc.) é possível representar o número deles como uma função de massa, N (H), ou de tamanho, N (R), na forma de lei de potência, por ex.:

N(M) α M^{- β}

onde: N – número, M – massa e β – índice de proporcionalidade.

http://www.phys.unm.edu/~gbtaylor/astr422/lectures/04_A422_ISM_IV.pdf

Função de Massa

A distribuição de tamanho em população observada obedece a uma lei de potência com uma inclinação de -4 para corpos com raios 350 km > r > 150 km (*"The population size distribution of the Kuiper Belt", Trilling, D. E. , 2002 http://adsabs.harvard.edu/abs/2002DPS....34.0906T*):

$N(R) \alpha R^{-4}$





Função de Massa

Exemplo. Admitamos duas populações com massas diferentes: 1M e 10M.

(a) há 21,5 vezes mais objetos de massa 1M que de massa 10M. Veja:

Lembrando que N(M) α M^{-4/3} N(M)/N(10xM) = M^{-4/3}/(10xM)^{-4/3} = 10^{4/3} = 21,5

(b) A massa total dos objetos de massa 1M é 2,2 vezes maior que a massa total de objetos com massa 10M. Explicando: a massa total de N objetos de massa M é $M_T = MxN = MxN(M) \alpha MxM^{-4/3} \alpha M^{-1/3}$.

Logo a razão entre as massas é:

 $M^{-1/3}/(10 \text{ x} \text{ M})^{-1/3} = 10^{1/3} = 2,2$

http://www.phys.unm.edu/~gbtaylor/astr422/lectures/04_A422_ISM_IV.pdf

Portanto, para o caso em que $\beta = -4/3$ tem-se mais massa acumulada por pequenos objetos.

Já no caso em que β = -1, a massa acumulada pelos objetos maiores é a predominante.

A função de massa é uma limitação na nossa compreensão da origem da população. Os KBOs representam sobras do processo de formação planetária. Tamanhos afetados pelo crescimento através de colisões (que tendem a crescer com o acúmulo de massa dos corpos), fragmentação provocado por colisões, ejeção do Sistema Solar por interação gravitacional etc., a Função de Massa nos ajuda a entender a importância (contribuição) de cada processo.

A presença de gelo

KBOs com satélites e dimensões conhecidas permitem concluir que suas densidades são consistentes com mistura de gelo e rocha

Composição da superfície: é variável, mas para os grandes KBO é dominada por voláteis, como água, metano, dióxido de carbono e outros.

Seria isso indicativo de interação entre atmosfera e superfície?



http://www.gps.caltech.edu/~mbrown/planetlila/

A presença de gelo

KBOs com satélites e dimensões conhecidas permitem concluir que suas densidades são consistentes com mistura de gelo e rocha

The plot above compares the amount of infrared sunlight of different colors ("wavelength") reflected from the new planet with the amount of sunlight reflected from Pluto. The dips in the amount of sunlight at 1.15, 1.35, 1.7, and 2.3 um are a characteristic signature of a surface covered with solid frozen methane (natural gas). Both Pluto and Eris show these signatures. At the low temperatures verv of Pluto and Eris, methane, which is in gaseous form on the earth, is frozen solid. The interior of Eris, like the interior of Pluto, is likely a mixture of rock and ice.



Características dinâmicas



Cores



As cores implicam que a origem e a composição devam ser diferentes?

Trujillo and Brown, 2002

Características dinâmicas



- Em 1992, David Jewitt e Jane Luu descobrem o primeiro objeto do Cinturão de Kuiper: 1992 QB1
- Estimativas
 - Quantidade : ~ 70.000 objetos
 - Tamanhos: > 100km
 - Massa total: 0,06 a 0,3 M_\oplus
- Fonte dos cometas de curto período

letters to nature

Nature 362, 730 - 732 (22 April 1993); doi:10.1038/362730a0



DAVID JEWITT* & JANE LUU*

* Institute for Astronomy, University of Hawaii, 2680 Woodlawn Drive, Honolulu, Hawaii 96822, USA

[†] Department of Astronomy, 601 Campbell Hall, University of California at Berkeley, Berkeley, California 94720, USA



files/iı Discovery.jpg n.org/sit Astro-Laureates <u>rw.kavlif</u> potligl

- Largura do cinturão: de 30 a 55 UA
 - Concentração maior:
 de 39,5 UA (ressonância 3:2) a 48 UA (ressonância 1:2)
- Espessura do cinturão: até 10° fora do plano da eclíptica
 - Distribuição mais difusa estende-se para as partes mais externas.



Classificação dinâmica dos KBO

- Há 3 grupos principais de objetos :
 - Os Clássicos
 - Os Ressonantes
 - Os Espalhados (esparramados)



Grupos dos KBO – Os Clássicos

Cubiwanos (nome derivado de 1992 QB₁)

- Localização entre 42 e 47 UA
- Não são ressonantes com Netuno
- Dividem-se em 2 populações:
- Dinamicamente frios:
- Órbita quase circular (e < 0.1)
- Baixa inclinação (i <10°)
- Composição de cor avermelhada
- Formados naquela posição, mas podem ter migrado por influência de Netuno
- Dinamicamente quentes:
- Órbita quase circular (e < 0.1)
- Elevada inclinação (i <30°)
- Possivelmente formados nas proximidades de Júpiter e ejetados posteriormente.





Grupos dos KBO – Os Ressonantes

- Aprisionados em ressonâncias de movimento médio com Netuno
- 2:3 Plutão e "Plutinos"
 - Semi eixo maior ~ 39,4 UA
 - ~ 200 objetos

- 1:2 twotinos"
 - Semi eixo maior \sim 47,7 AU
 - Esparsamente povoada





Trans-Neptunian objects

Grupos dos KBO – Os Espalhados

- Excentricidades elevadas: 0,59
- Inclinações elevadas: ≈ 24°
- Fonte dos cometas da família de Júpiter





Grupos dos KBO – Os Espalhados

- Excentricidades elevadas: 0,59
- Inclinações elevadas: ≈ 24°
- Fonte dos cometas da família de Júpiter



http://commons.wikimedia.org/wiki/File:TheKuiperBelt_100AU_SDO.svg

Grupos dos KBO - Cores


Sistema Plutão

- Baricentro está entre Plutão e Caronte
- São conhecidos 5 satélites
 - Caronte (metade do diâmetro de Plutão)
 - Nix (Diâ: 46 136 km e no mesmo plano orbital de Caronte)
 - Hidra (Diâ: 44 134 km e ressonância ~1:6 com Caronte)
 - Cérbero (Diâ: 13 34 km)
 - Estige (Diâ: 10 25 km)
- Atmosfera:

- N₂, CH₄, CO



Imagens: http://en.wikipedia.org/wiki/Charon_(moon)

Período rotacional de Plutão e de Caronte, assim como o período orbital de ambos em torno do centro de massa, é único: 6d 9h 21m

Plutão e Caronte têm sempre o mesmo hemisfério voltado um para o outro. Não há "nascer" ou "pôr" de um em relação ao outro.

Isso é consequência do bloqueio por maré (sincronismo).



www3.amherst.edu/~gsgreenstein/progs/animations/pluto_charon.gif

http://en.wikipedia.org/wiki/Barycentric_coordinates_(astronomy)

- Os KBO clássicos e ressonantes provavelmente não são primordiais
 - Inclinações e excentricidades são muito elevadas
 - Teorias ?
 - Efeitos de longo termo de perturbações planetárias
 - Varredura ressonante decorrente da migração planetária
 - Dispersores em abundância resultando em impactos e perturbações gravitacionais.

- Concentrados entre 33 e 50 UA
- Compostos de NH₃, CH₄ & H₂O congelada
- Quaoar tem superfície coberta por gelo de água cristalina
 - Há evidencia de processo de remodelação da superfície
- Três tipos de objetos:
 - Clássicos
 - Ressonantes
 - Espalhados



Image from: http://en.wikipedia.org/wiki/Kuiper_belt

- Centauros (cometas) tem composição semellhante
 - Podem ter origem no Cinturão Kuiper