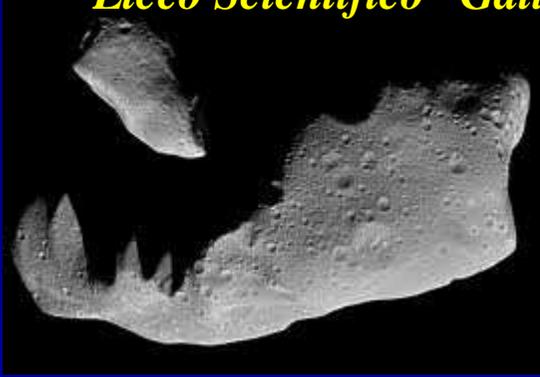


Liceo Scientifico "Galilei" – Macerata, 23 ottobre 2012

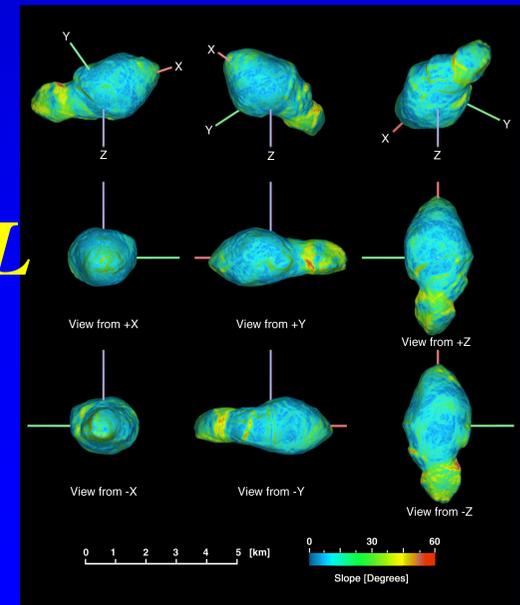


Asteroidi e Comete



**I CORPI MINORI DEL
SISTEMA SOLARE**

Manlio Bellesi



DEFINIZIONI

Il nostro Sistema Solare è costituito da:

✓ *Una stella*

✓ *8 pianeti*

✓ *Alcune decine (?) di pianeti nani*

✓ *Qualche centinaio (?) di satelliti*

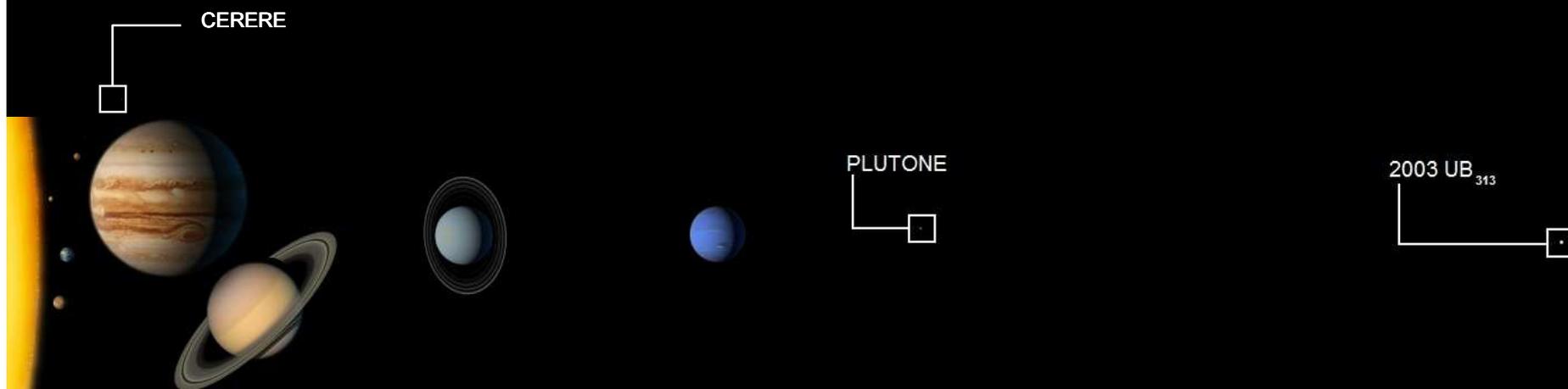
✓ *Centinaia di miliardi (o più) di **CORPI MINORI***

UNO SGUARDO DI INSIEME

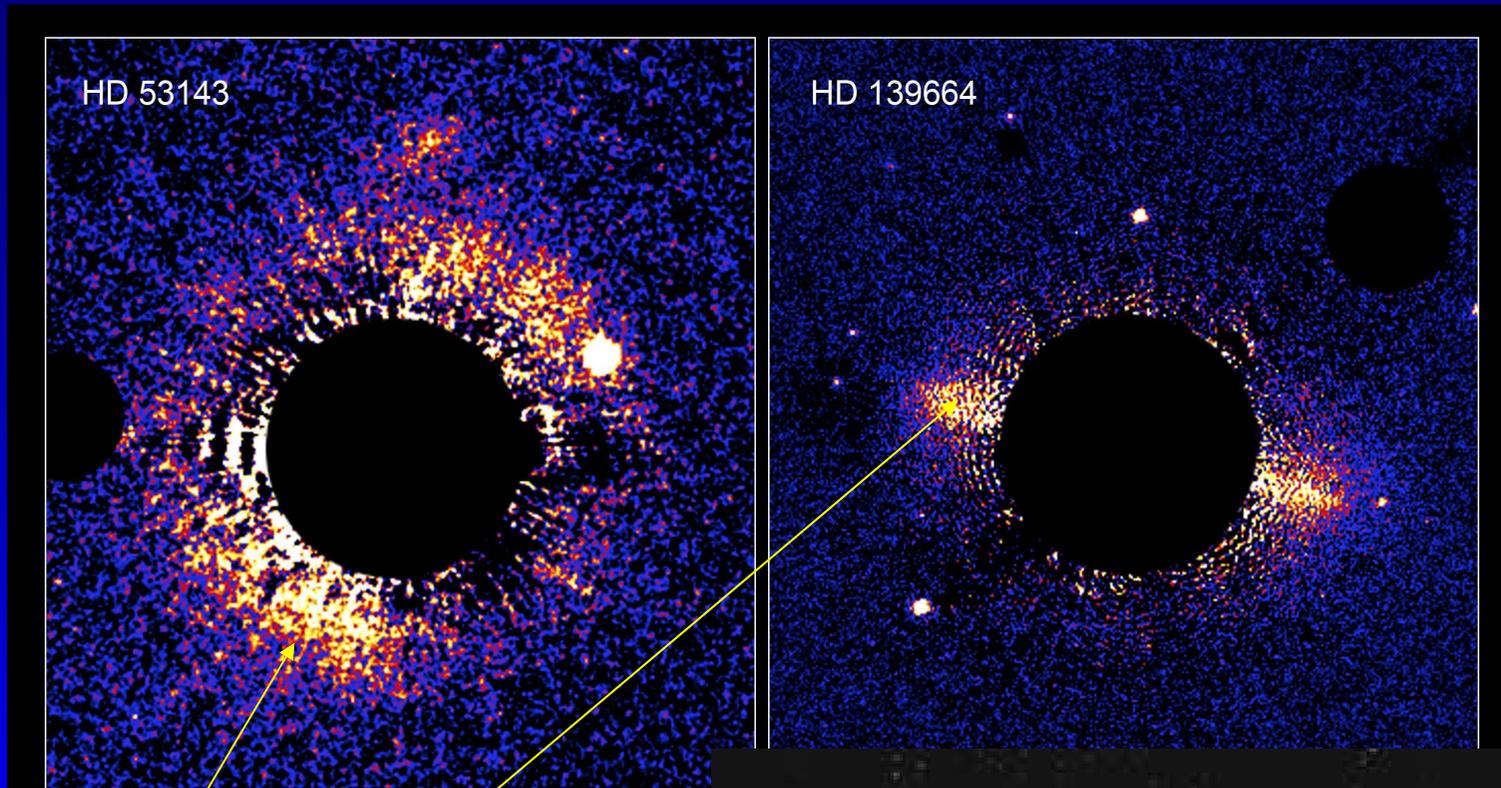


N.B. LA FIGURA NON È IN SCALA PER LE DISTANZE!

Mantenendo distanze e dimensioni ...

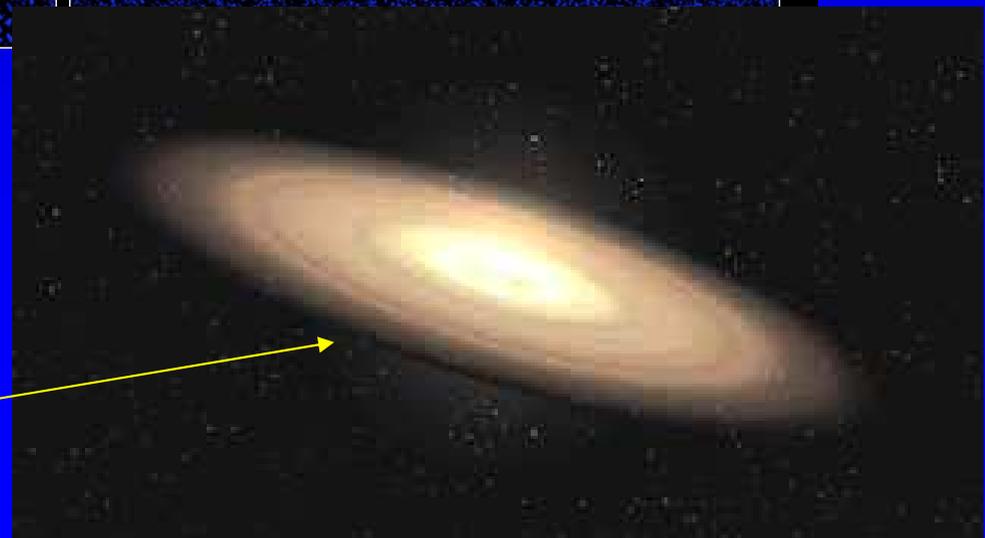


FORMAZIONE DI UN SISTEMA PLANETARIO



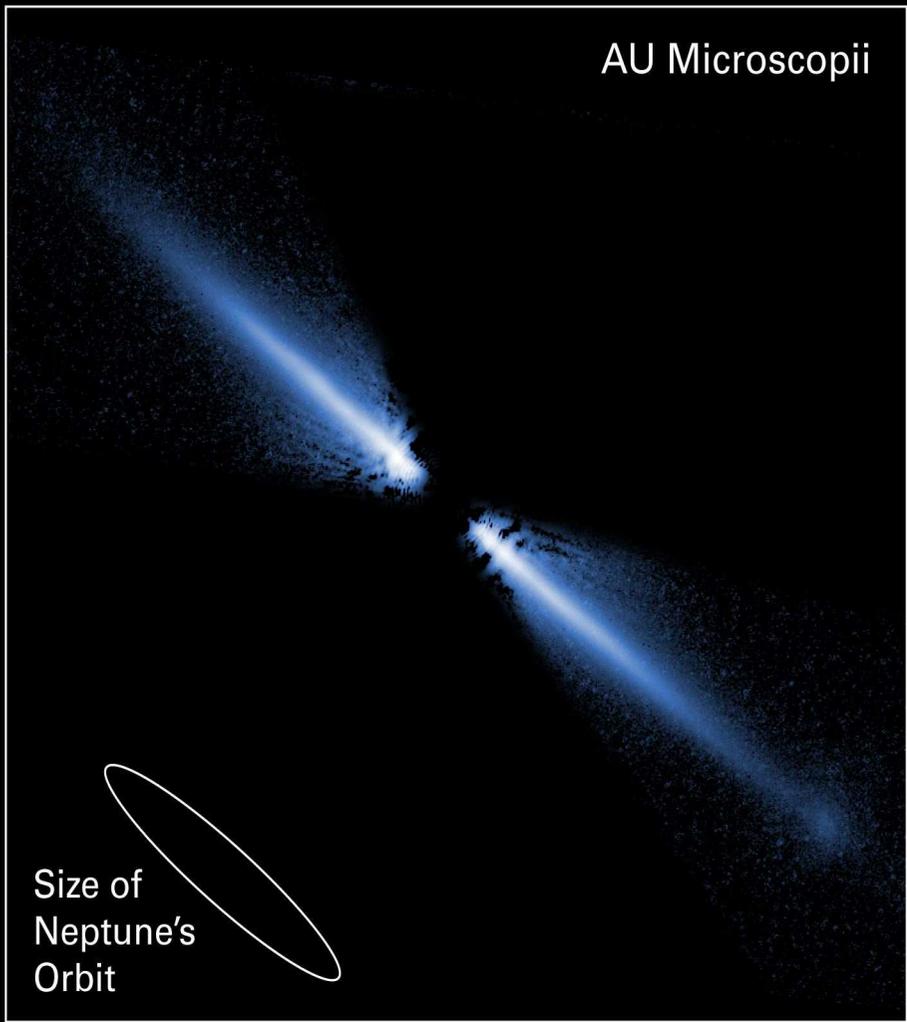
*Dischi di materiale attorno
ad altre stelle*

*Modello di un disco
protoplanetario*

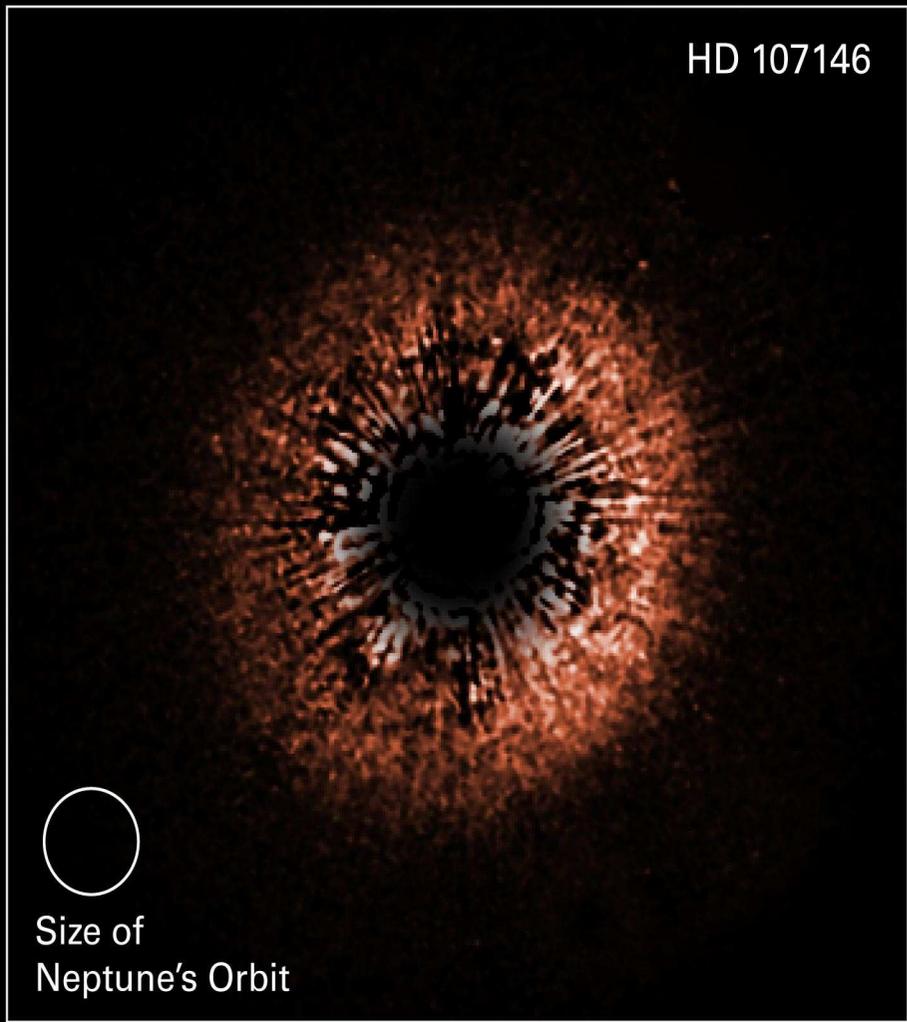


AU Microscopii

HD 107146



Size of
Neptune's
Orbit



Size of
Neptune's
Orbit

Circumstellar Debris Disks Hubble Space Telescope • ACS HRC

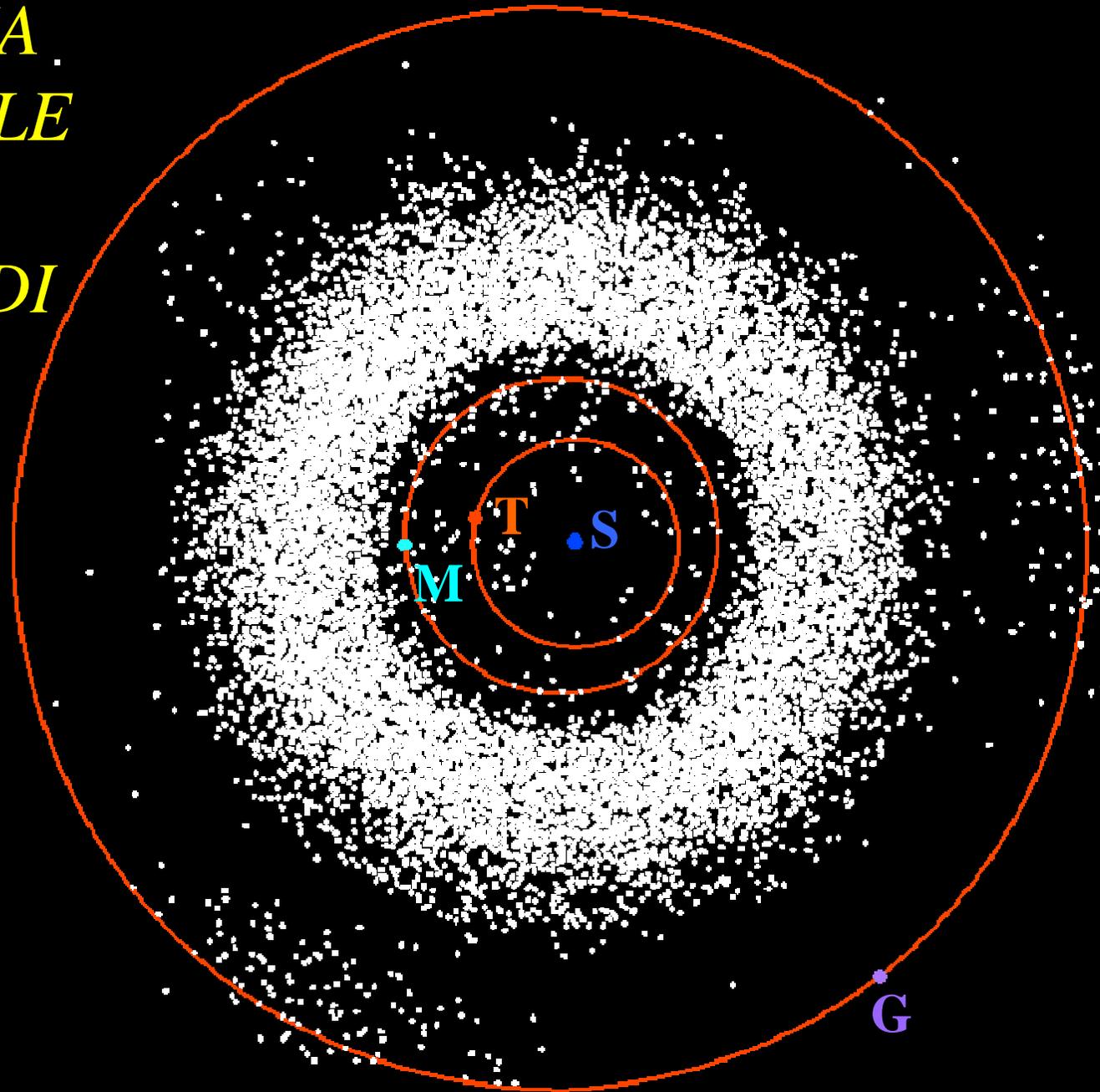
NASA, ESA, J. Krist (STScI/JPL), D.R. Ardila (JHU), D.A. Golimowski (JHU), M. Clampin (NASA/Goddard),
H. Ford (JHU), G. Hartig (STScI), G. Illingworth (UCO-Lick) and the ACS Science Team

STScI-PRC04-33a

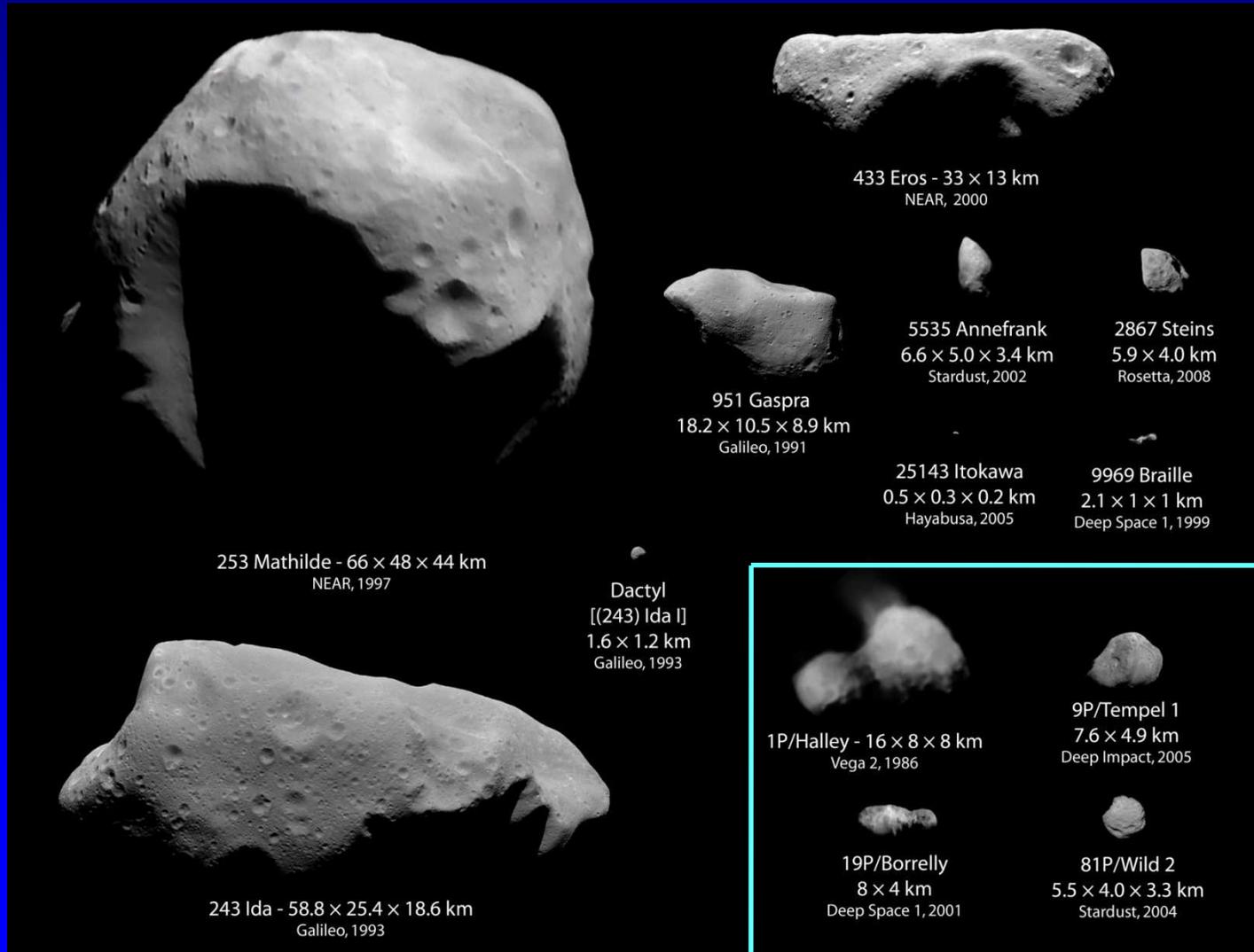
GLI ASTEROIDI

- Sono corpi rocciosi (di varia composizione) confinati, per la maggior parte, in una zona posta fra le orbite di Marte e di Giove (FASCIA PRINCIPALE). L'ultimo censimento ne enumera più di trecentomila.
- Il più grande, Cerere, ha un diametro di circa 1000 km. Pallade e Vesta hanno un diametro di circa 500 Km
- Alcuni (circa 850) hanno orbite che intersecano quella della Terra
- Rappresenterebbero resti del materiale da cui ha avuto origine il Sistema Solare, che non hanno mai potuto aggregarsi in un pianeta a causa delle perturbazioni provocate da Giove
- Attualmente sono tra gli oggetti più studiati per le informazioni che possono fornire sul Sistema Solare primitivo

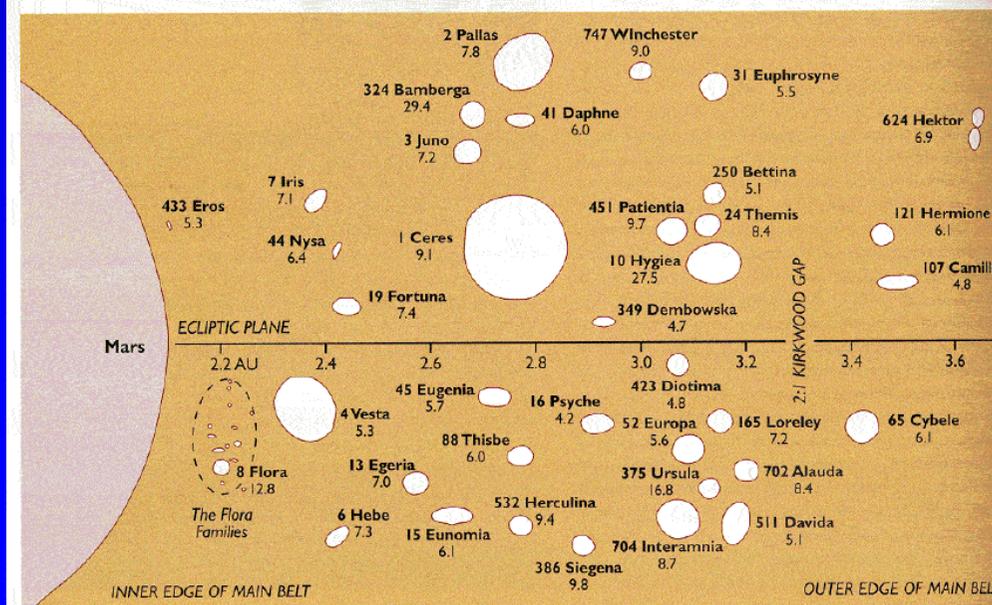
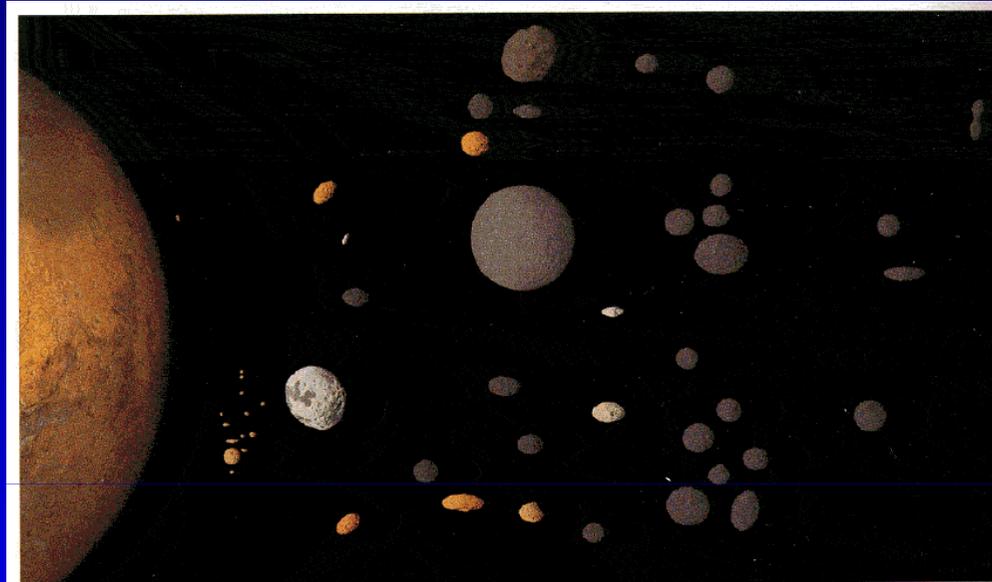
*LA FASCIA
PRINCIPALE
DEGLI
ASTEROIDI*



ALCUNI ASTEROIDI E COMETE A CONFRONTO



PICCOLI... E QUASI MAI SFERICI



ALCUNE ORBITE DI ASTEROIDI INTERSECANO QUELLA DELLA TERRA



*Traccia dell'asteroide
2004XP14*

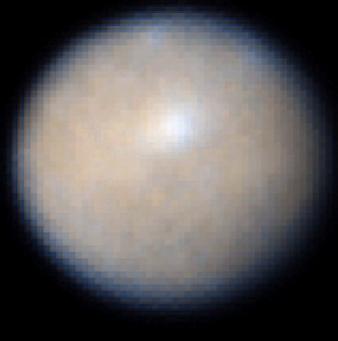
Dimensioni: ~ 600 m

*Il 3 luglio 2006 è
passato a poco più di
400000 km dalla Terra.*

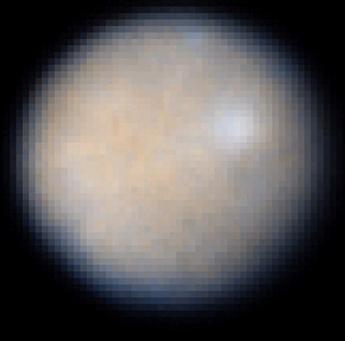
CERERE

Scoperto a Palermo da G. Piazzi il 1° gennaio 1801 e considerato il “pianeta mancante” (per qualcuno, addirittura, un frammento del Paradiso terrestre). Uno dei pochissimi asteroidi sferici, ha un diametro di 914 km

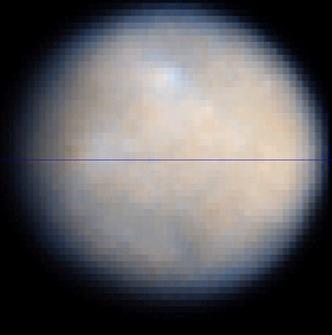
(Immagini HST)



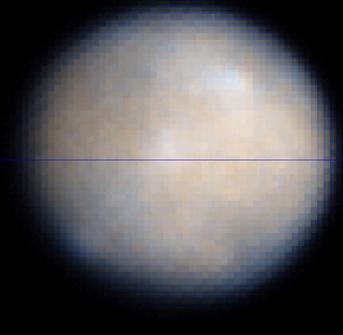
Dec. 30, 2003 15:46 UT



Dec. 30, 2003 16:21 UT



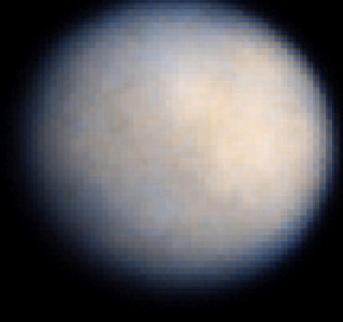
Jan. 23, 2004 23:40 UT



Jan. 24, 2004 00:15 UT



Jan. 24, 2004 02:52 UT

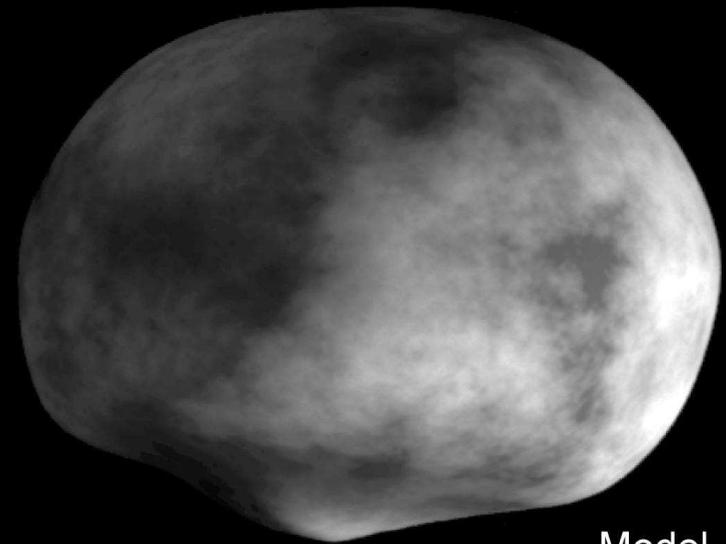


Jan. 24, 2004 03:27 UT

VESTA

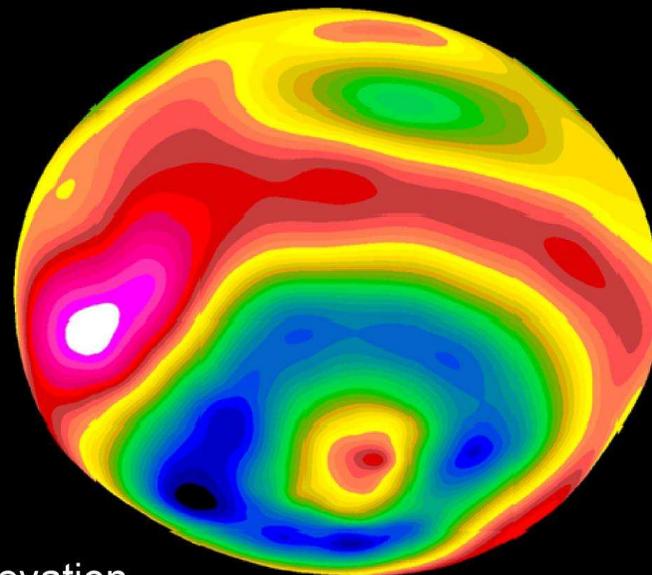


HST

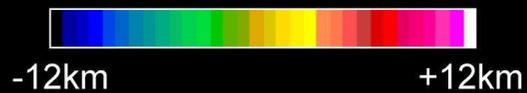


Model

*È, forse, l'unico
asteroide che conservi
buona parte della
crosta originaria*



Elevation



(Immagine HST)

GASPRA



TUTTI gli asteroidi mostrano
una quantità
IMPRESSIONANTE di crateri

ASTEROIDI CON SATELLITI
— IDA E DACTYL —



EVOLUZIONE COLLISIONALE DEGLI ASTEROIDI

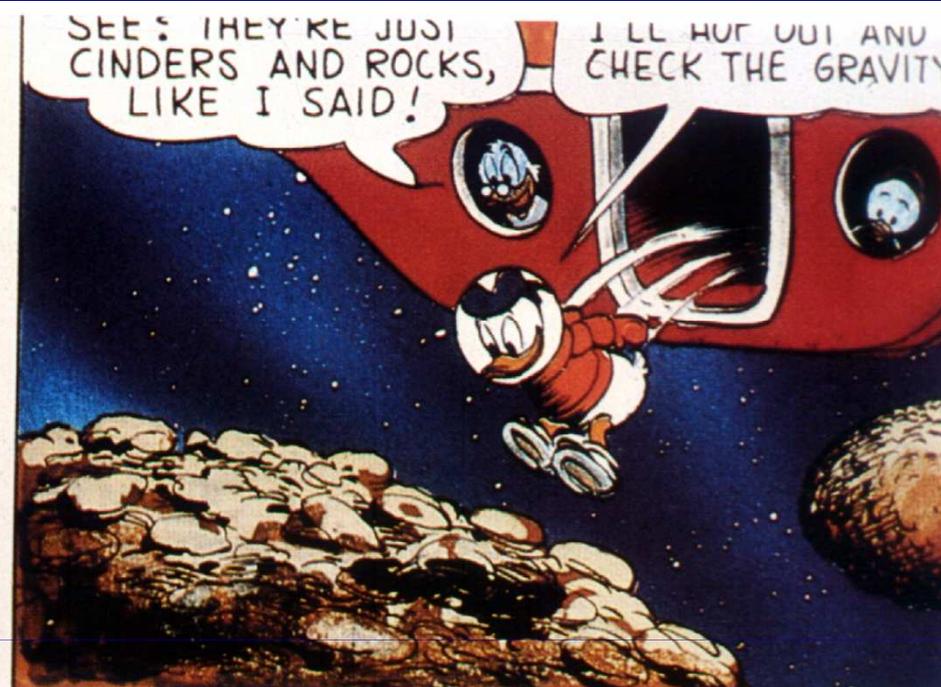
L'aspetto attuale degli della fascia degli asteroidi NON è quello primitivo. Giove ne ha impedito la fusione in unico pianeta e ne ha accelerato le velocità attraverso incontri ripetuti, creando il più grande AUTOSCONTRO del Sistema Solare.

*A velocità dell'ordine dei 5 km/s (18000 km/h) quasi tutti questi corpi sono stati distrutti dalle reciproche collisioni, lasciando dietro sciame di frammenti (**FAMIGLIE**) a testimonianza degli impatti. Le famiglie tendono con il tempo a disperdersi, a causa delle perturbazioni gravitazionali.*

*In diversi casi (forse molti) i frammenti si sono ricombinati sotto l'azione delle reciproche interazioni gravitazionali, creando veri e propri "mucchi di ghiaia" (**RUBBLE PILES**) senza alcuna coesione.*

*I pochissimi asteroidi non distrutti portano comunque le cicatrici di innumerevoli impatti (**CRATERI**)*

WALT DISNEY AVEVA RAGIONE...



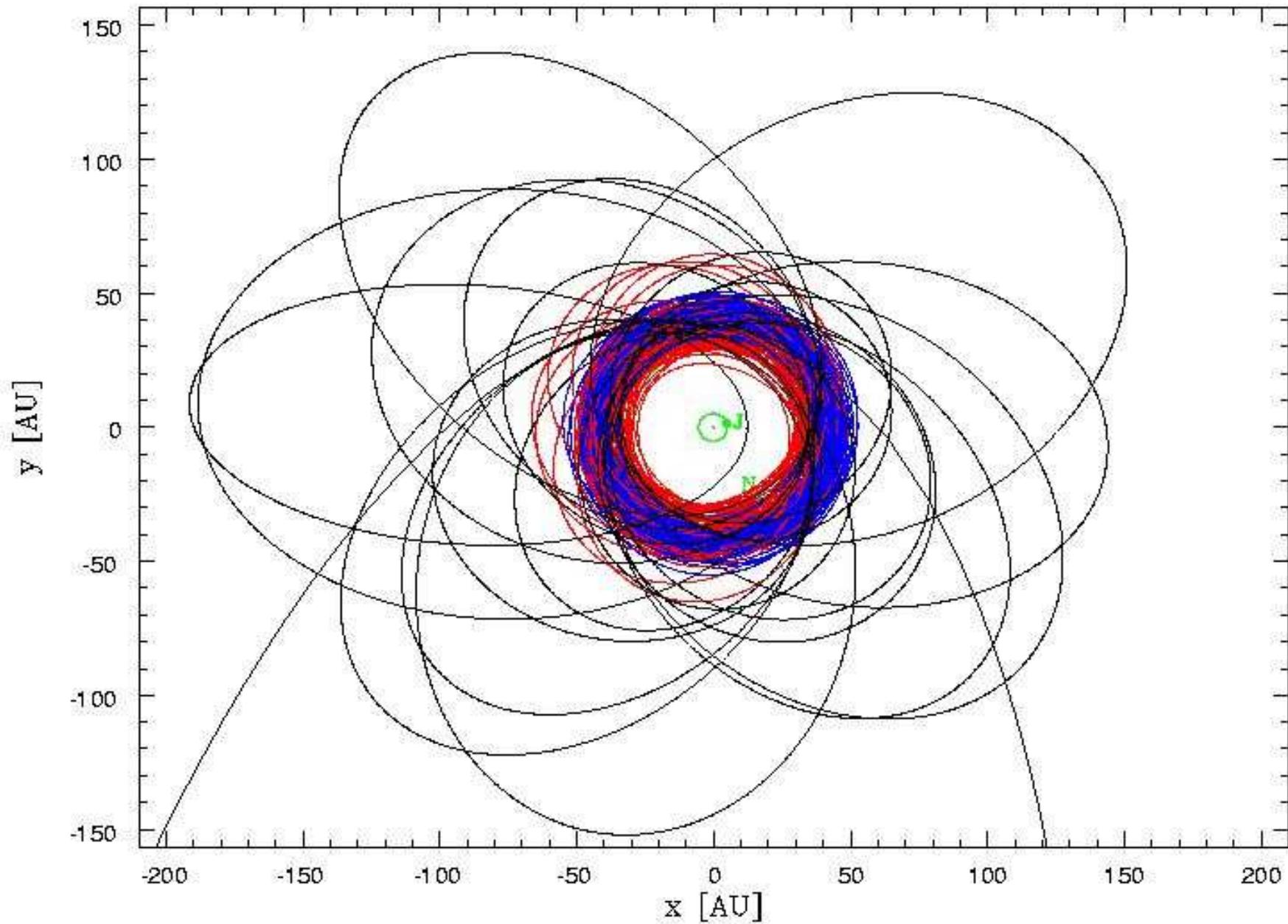
I serbatoi delle comete: la Cintura di Edgeworth-Kuiper e la Nube di Oort

La Cintura (o Fascia) di Edgeworth-Kuiper è una regione, più o meno a forma di disco, che si estende fra 5 miliardi e 200-300 miliardi di km dal Sole, oltre l'orbita di Nettuno.

La Nube di Oort è invece una regione sferica che si suppone estesa fino a circa due anni luce dal Sole (a metà strada della distanza di Alfa Centauri, la stella a noi più vicina)

Tra le centinaia di miliardi di oggetti che tali strutture contengono si trovano forse migliaia di oggetti come Plutone (2300 km), o addirittura più grandi.

FASCIA DI EDGEWORTH-KUIPER





*La nube di Oort
(ricostruzione)*

This figure shows a reconstruction of the Oort cloud, a vast, roughly spherical region of icy bodies surrounding the Solar System. It is depicted as a dense, multi-layered shell of small white dots. A blue arrow points from the text box to a specific region within the cloud.

PLUTONE

Più piccolo della Luna, Plutone fu scoperto nel 1930 da C.W Tombaugh e non è stato ancora esplorato da sonde spaziali.

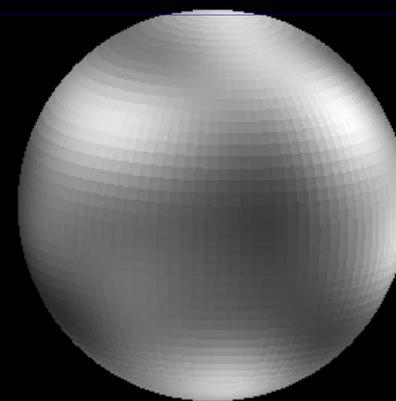
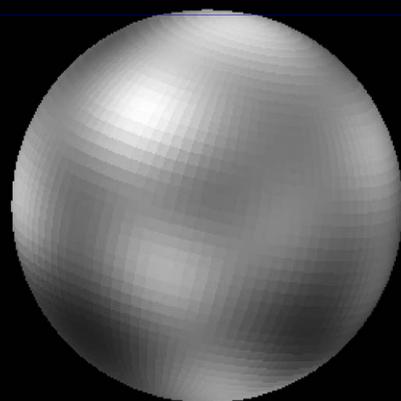
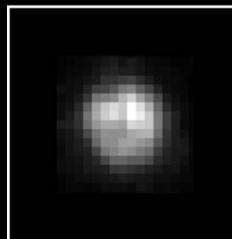
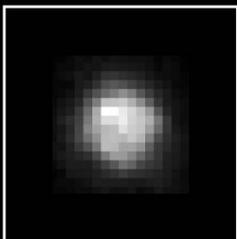
Nel 1978 fu scoperto un grande satellite, Caronte, e nel 2005 due corpi più piccoli (Nix e Hydra).

Fra il 1985 e il 1990 la Terra si è venuta a trovare sul piano dell'orbita di Caronte attorno a Plutone ed è stato possibile osservare le mutue eclissi; la loro durata (circa 4 ore) ha permesso di determinare con precisione i diametri di Plutone (2300 km) e di Caronte (1190 km).

Plutone possiede un nucleo roccioso.

Le somiglianze tra Plutone e Tritone (uno dei satelliti di Nettuno) sono tali da aver fatto pensare a un'origine comune.

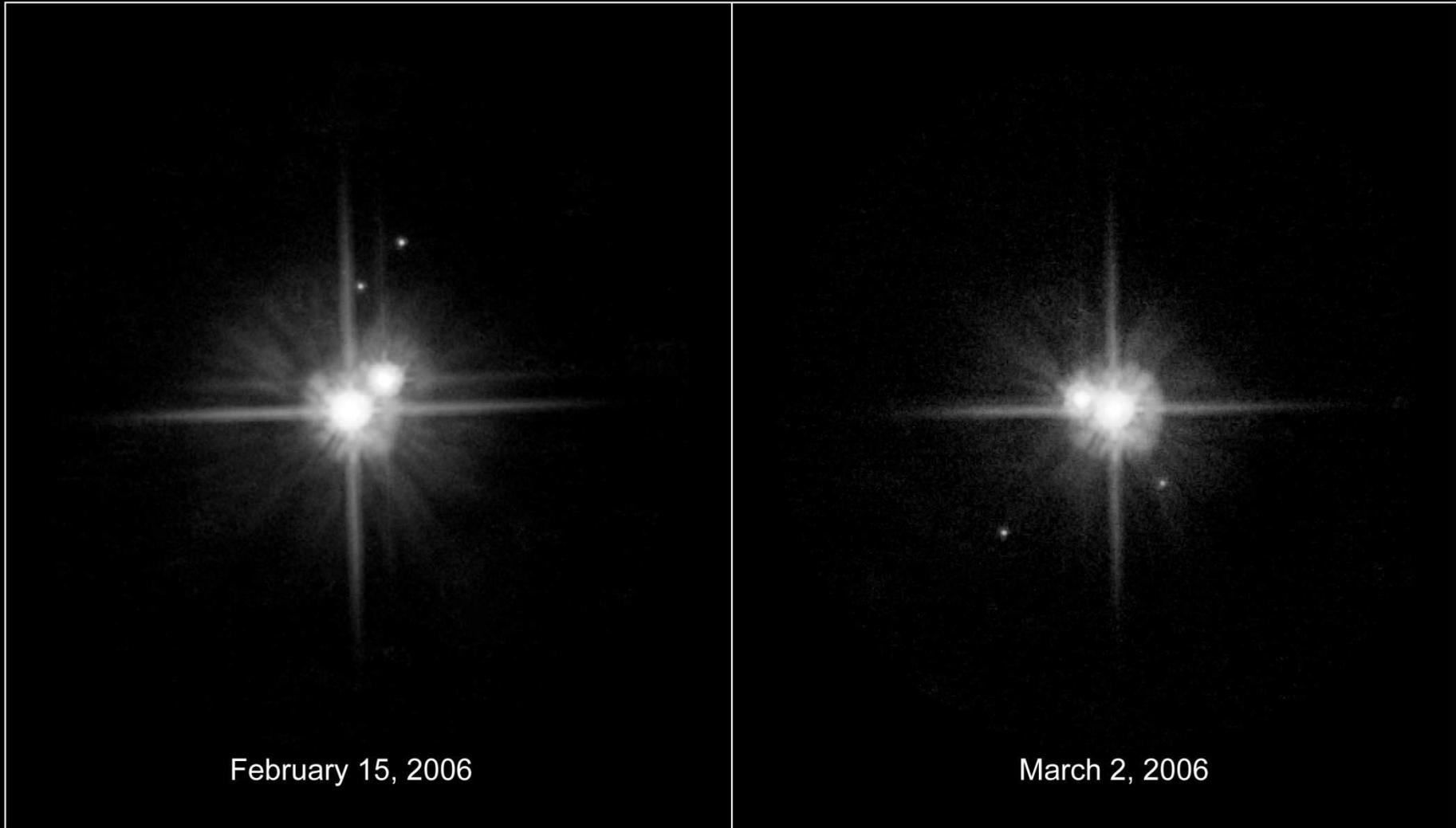
PLUTONE



PLUTONE (e gli ultimi due satelliti scoperti)

Pluto System

Hubble Space Telescope ■ ACS/HRC



February 15, 2006

March 2, 2006

NASA, ESA, H. Weaver (JHU/APL), A. Stern (SwRI), and the HST Pluto Companion Search Team

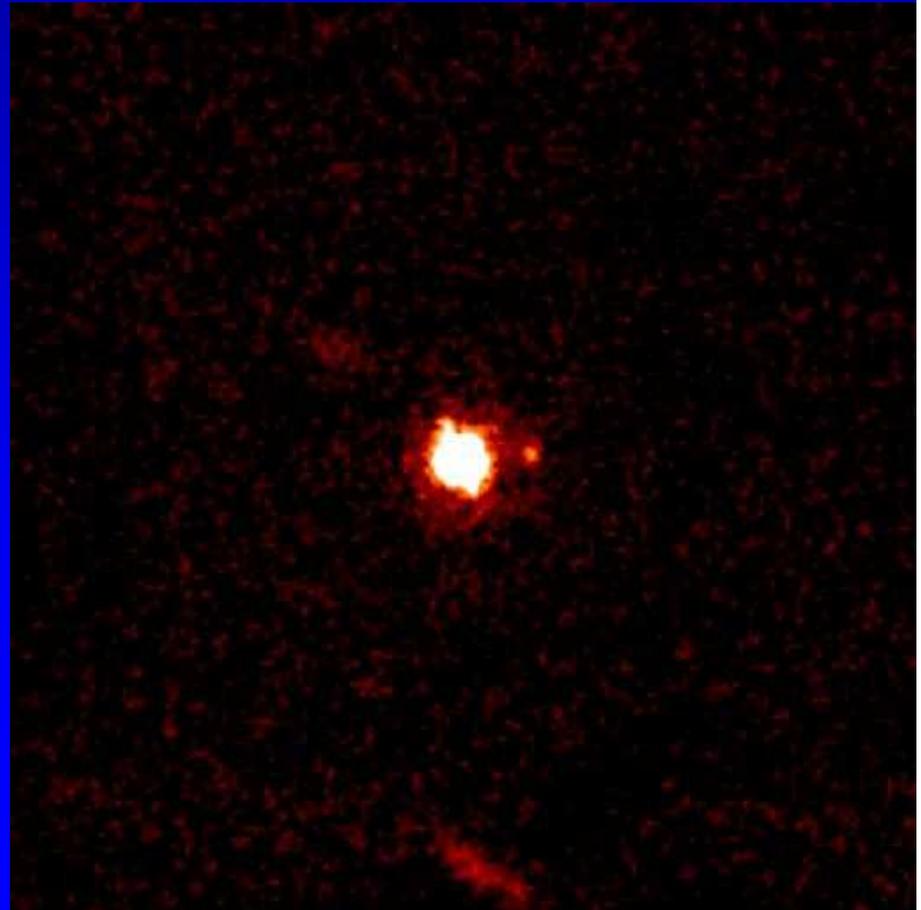
STScI-PRC06-15

2003 UB313 (ERIS)

È stato scoperto dallo staff di Mike Brown del Caltech di Pasadena tra il 2003 e il 2004, e la notizia è stata ufficializzata alla fine di luglio del 2005.

Chiamato inizialmente Xena, dal settembre 2006 porta il nome di Eris, che nella mitologia greca personifica la discordia...

...infatti la sua scoperta ha provocato la retrocessione di Plutone in un burrascoso congresso dell'Unione Astronomica Internazionale (Praga, agosto 2006)



ERIS

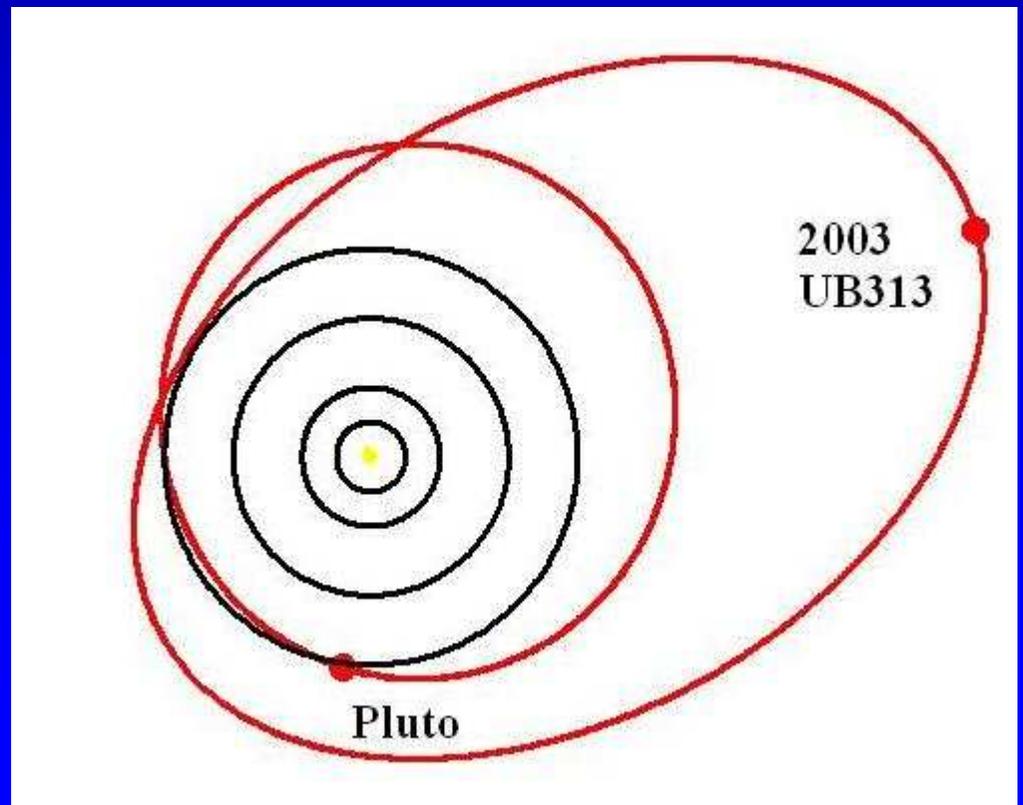
È il più grande dei pianeti nani, Plutone compreso. Si trova ad una distanza media dal Sole di circa 67 UA (circa 10 miliardi di km), con il perielio posto a circa 37,7 UA (5,6 miliardi di km) e l'afelio a circa 97,6 UA (14,6 miliardi di km).

Il periodo di rivoluzione è 557 anni, con un'orbita fortemente ellittica.

Si stima un diametro di 2400 km, con un'incertezza di 100, il che lo rende appena più grande di Plutone.

Le osservazioni nell'infrarosso hanno permesso di verificare sulla superficie la presenza di metano allo stato solido.

Ha una luna, Disnomia, con un diametro di circa 250 km.





DISNOMIA

2003 UB313
ERIS

Saturn

Jupiter

Uranus

Pluto
Neptune

LE COMETE

Sono anch'esse residui del materiale "di costruzione" del Sistema Solare, ma soprattutto dei pianeti esterni.

Si ritiene che la loro composizione sia molto simile a quella della nube che formò il Sistema Solare circa 4,55 miliardi di anni fa.

L'ottimo stato di conservazione del materiale fa sperare di poter ottenere informazioni essenziali per la comprensione del processo di formazione del Sistema Solare.

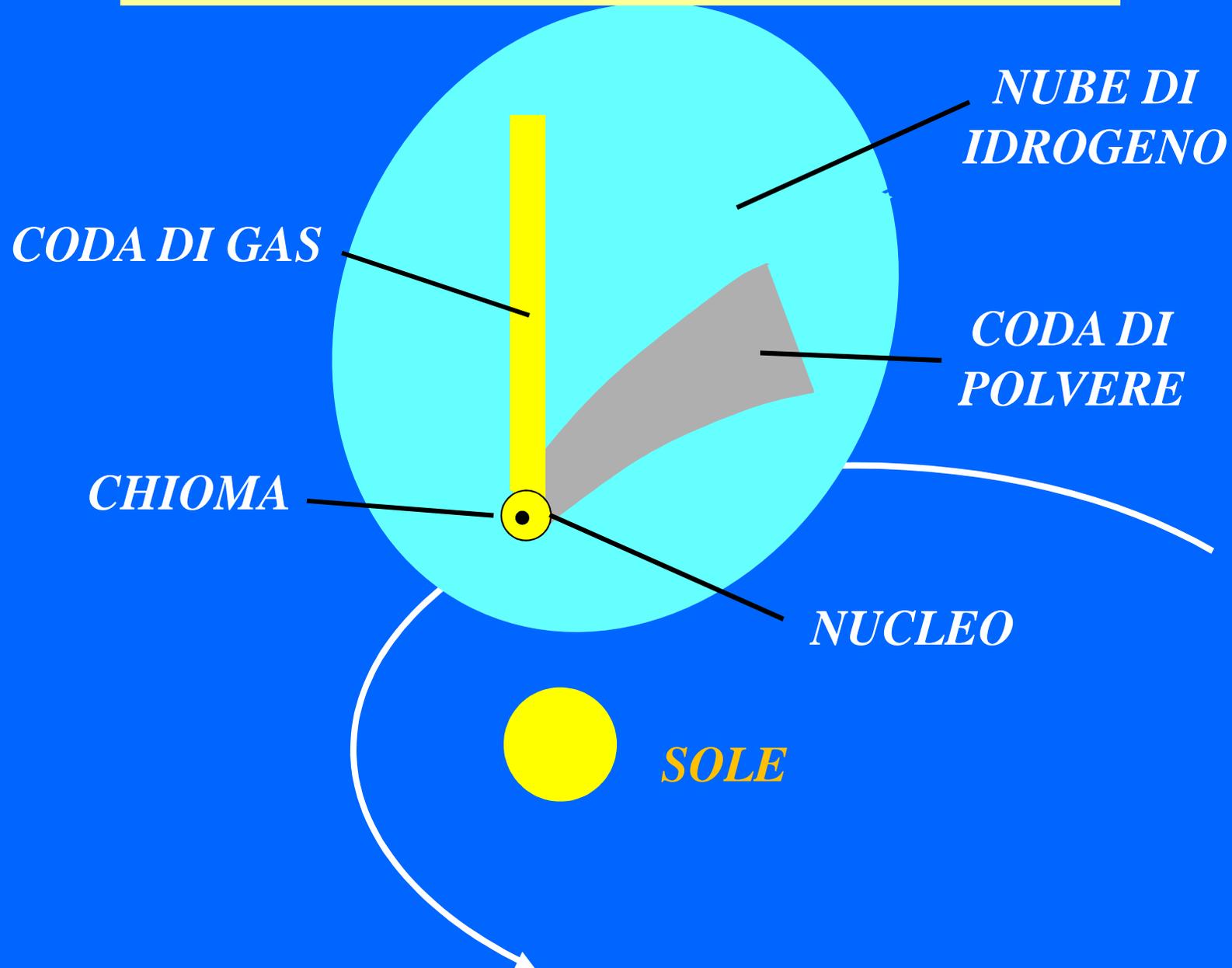
L'aspetto caratteristico delle comete è un effetto transitorio che si verifica solo in prossimità del perielio (che è il punto di massimo avvicinamento al Sole).

*Responsabile è l'azione della radiazione del Sole, nonché del vento solare, sul **NUCLEO**, unica parte permanente della struttura.*

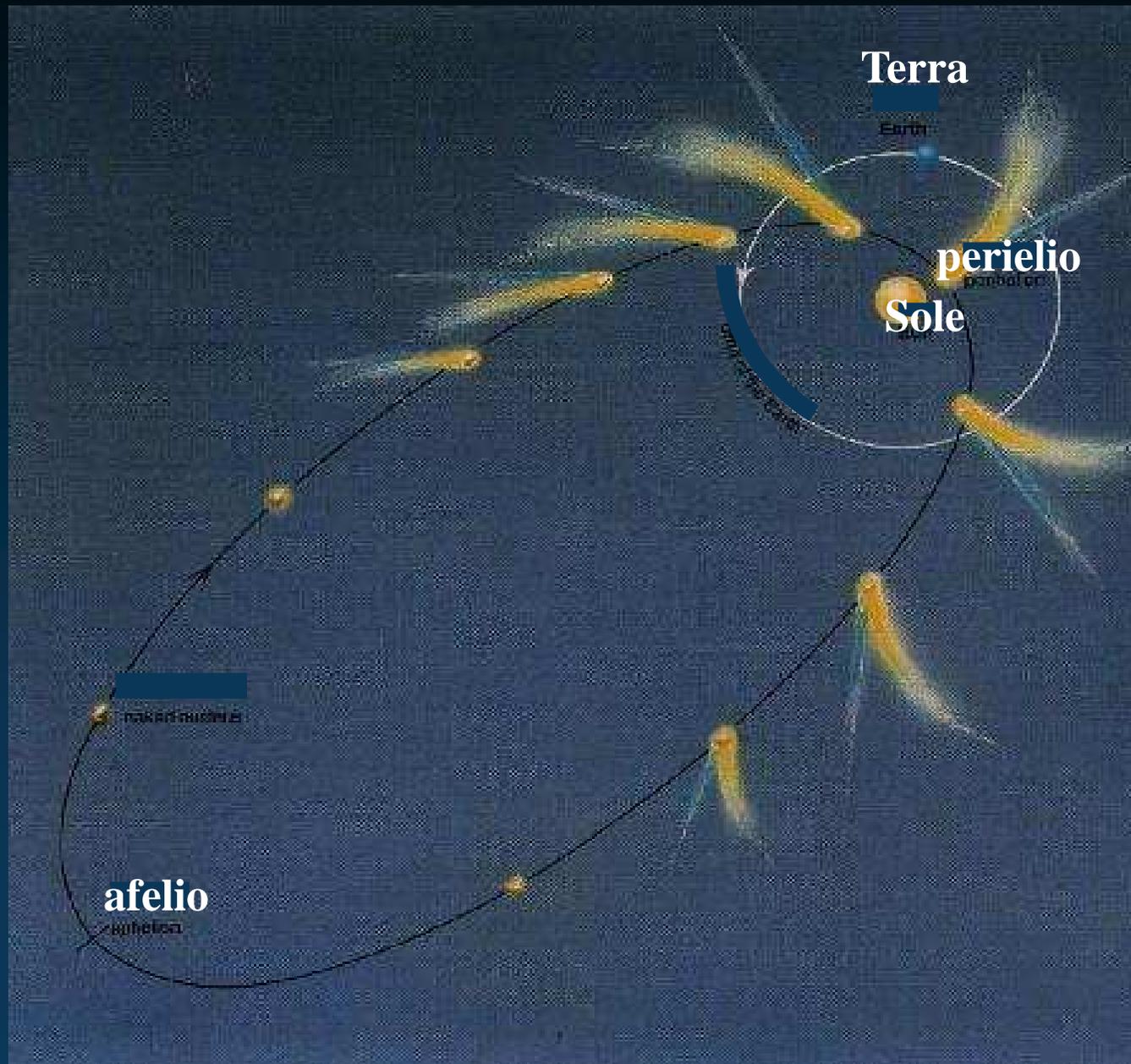


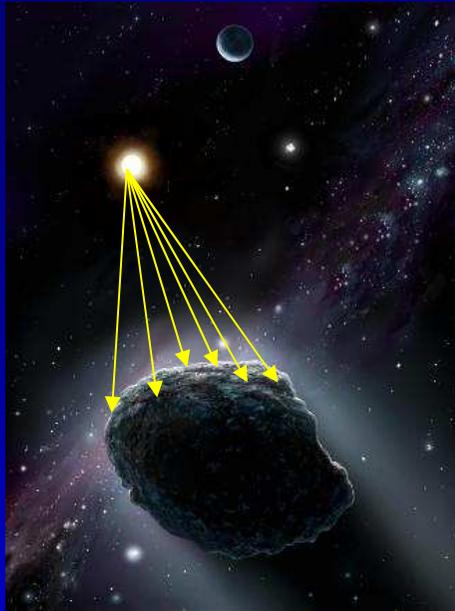
Cometa Kohoutek (1973f)

LE COMPONENTI DI UNA COMETA



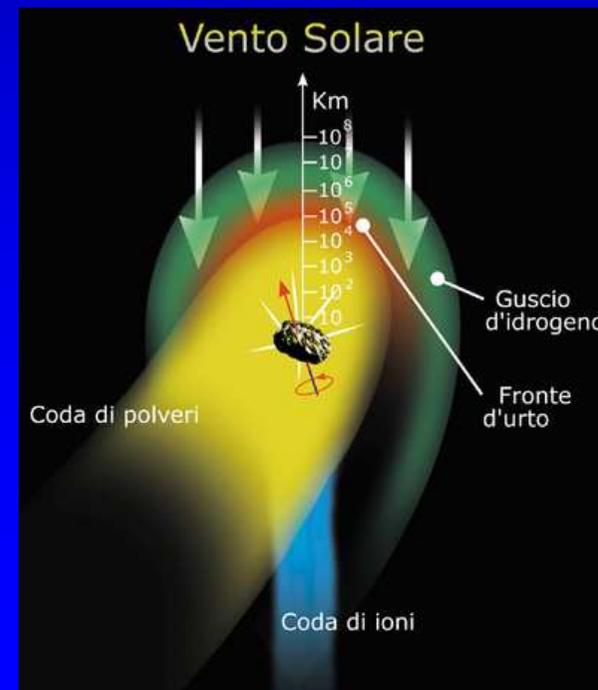
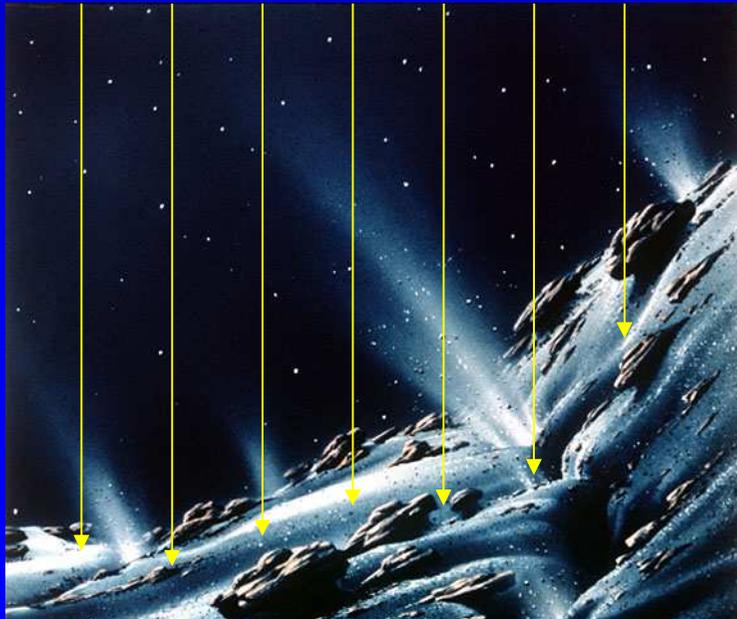
EVOLUZIONE DI UNA STRUTTURA COMETARIA



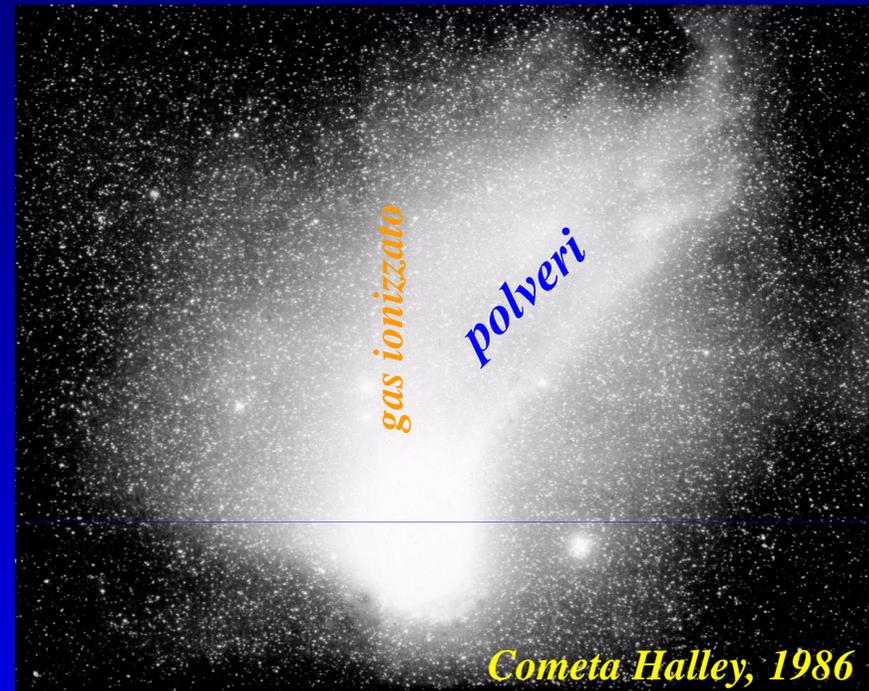


*L'azione del Sole fa evaporare la crosta del nucleo, da cui fuoriescono gas e polveri.
L'emissione riguarda solo alcune zone: ampie regioni del nucleo restano inerti*

*Il materiale espulso forma progressivamente le altre parti della cometa: **code** (una di gas ionizzati, una di polveri), **chioma**, **corona***



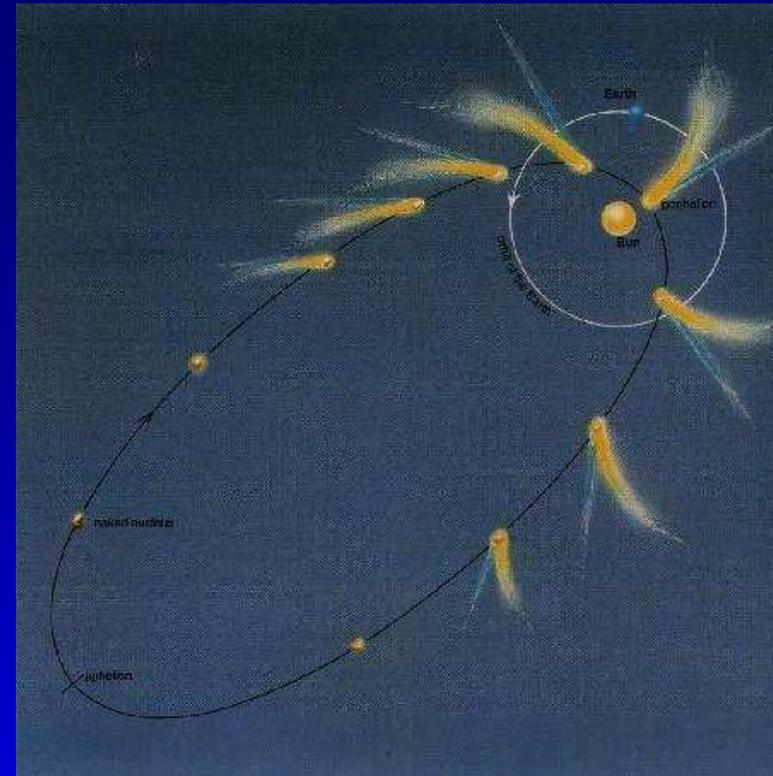
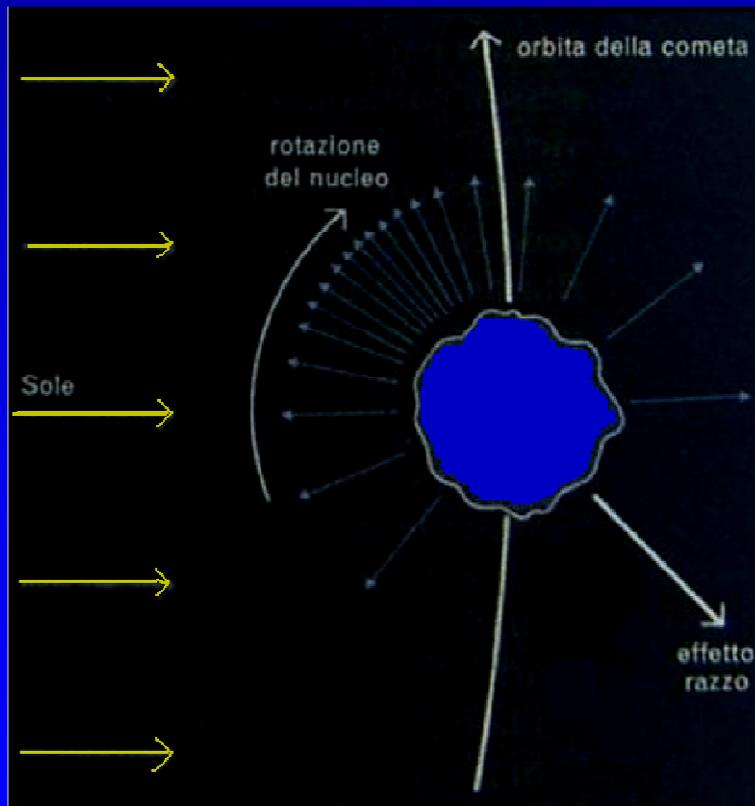
Le due code sono diverse e il loro aspetto varia anche da cometa a cometa



La coda di polveri viene deviata dall'azione del vento solare: la pressione di radiazione agisce sui grani di polvere in modo diverso a seconda delle loro dimensioni, della distanza dal Sole e della rotazione del nucleo

Le forme risultanti possono essere molto varie, ma la coda di polveri si allinea comunque in direzione opposta al Sole

La gravità solare e la pressione di radiazione dipendono entrambe da $1/r^2$, dove r è la distanza dal Sole. L'orbita risultante NON è un'ellisse perfetta, anche a causa dei getti di gas che modificano la traiettoria del nucleo come un aereo a reazione.



La sublimazione della crosta superficiale è determinata dall'intensità dell'irraggiamento solare e dipende da r^2 , dove r è sempre la distanza dal Sole. Qualsiasi deviazione da questa legge ci interessa, perché dipende dai dettagli del processo di espulsione di gas e polveri dal nucleo, di cui ancora oggi non sappiamo quasi nulla.

Il meccanismo di emissione del materiale dal nucleo è molto complesso: la radiazione solare in arrivo viene in parte riflessa e in parte assorbita.

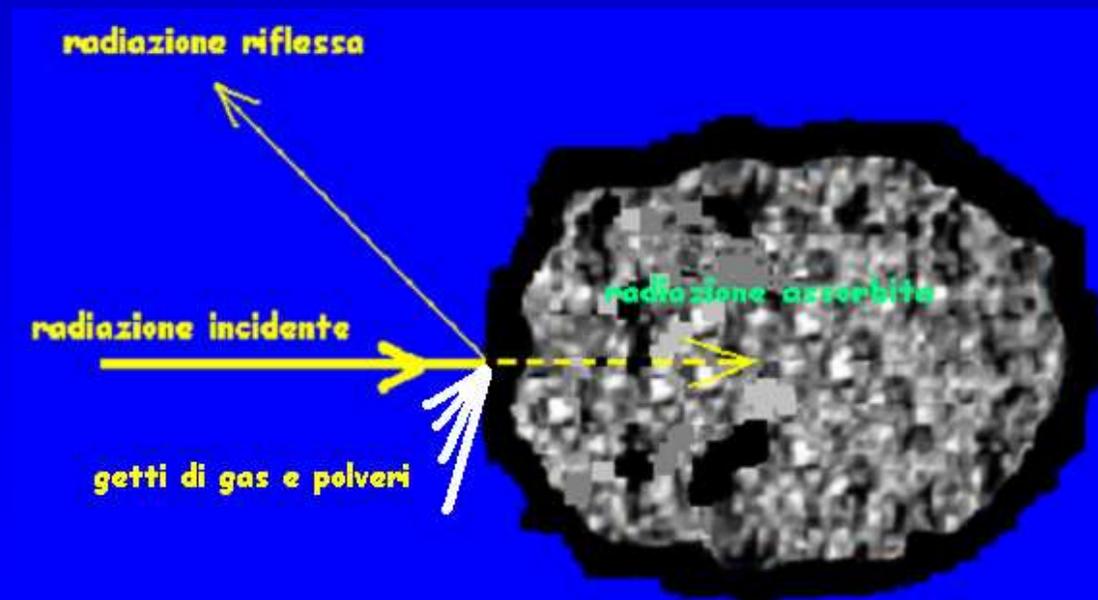
*La riflessione dipende dalla riflettività (**albedo**) della superficie, mentre l'assorbimento dipende dall'angolo di incidenza della radiazione e dalla **temperatura T** del nucleo.*

Una parte di quanto assorbito viene poi riemessa, a seconda della temperatura e delle proprietà strutturali del nucleo.

L'energia assorbita serve per la sublimazione della crosta, che lascia fuoriuscire gas e polveri dall'interno.

La quantità di gas e polveri emessa è assai variabile e, comunque, massima vicino al perielio.

*Valori per la cometa Arend-Roland (vicino al perielio):
gas 75 tonnellate/sec,
polveri 60 tonnellate/sec.*



LE PERDITE DI MASSA

Manca ancora una statistica attendibile: siamo al livello di ipotesi, per quanto attendibili.

Alla distanza della Terra (1 UA = 150 milioni di km) una cometa “tipica” perde 10-100 tonnellate al secondo; per un intero passaggio si può arrivare a 100-1000 miliardi di tonnellate, quasi tutte emesse vicino al perielio...

...che corrisponde a circa l' 1% dell'intera massa del nucleo. Le comete hanno dunque una vita MOLTO BREVE su scala astronomica: da 10000 anni per le comete a corto periodo fino a qualche milione di anni per le più eccentriche.

Le emissioni del nucleo cessano rapidamente quando la cometa si allontana, in particolare alla distanza di circa 3 UA, che corrisponde al congelamento dell'H₂O: si sono però osservate comete attive anche a distanze maggiori.

Se ne deduce che il componente principale del nucleo è ghiaccio d'acqua (~ 80%). Sono presenti anche altri “ghiacci” come CO, CO₂, CH₄, inglobati nella struttura a reticolo dei cristalli di ghiaccio d'acqua (CLATRATI) o sotto forma di composti idrati (CH₄·6H₂O, CO₂·6H₂O)

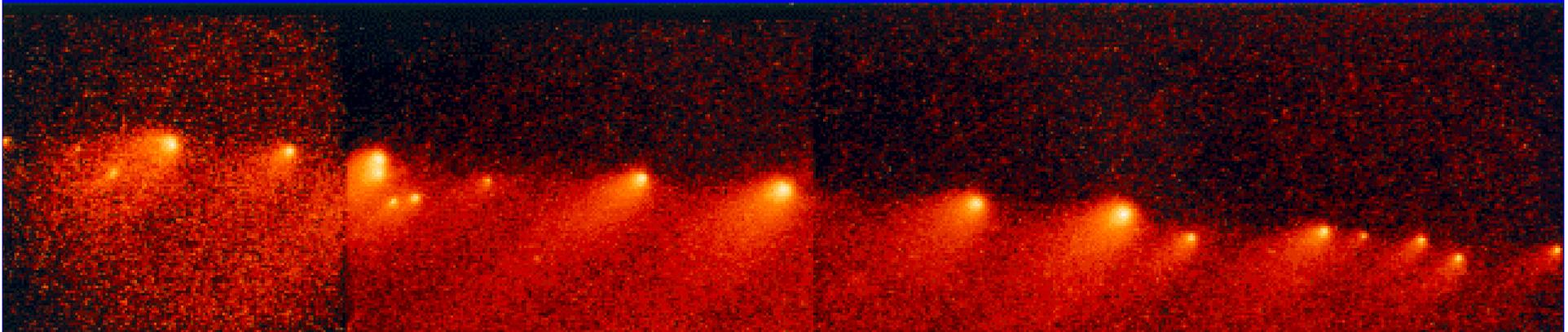
STRUTTURA DEL NUCLEO - 1

È costituito da un conglomerato di ghiacci vari (soprattutto ghiaccio d'acqua) e grani di polvere, composti probabilmente di silicati e molecole organiche, anche complesse.

La struttura dovrebbe essere porosa e poco compatta: spesso i nuclei si spezzano sotto l'azione di forze gravitazionali abbastanza intense. Tuttavia è raro che la distruzione sia completa (la cometa Shoemaker-Levy 9 si separò nel 1994 in 21 nuclei distinti prima dell'impatto finale con Giove – foto sotto e successiva).

Misure dirette della compattezza di nuclei cometari sono oggi ancora impossibili. Si usano allora metodi indiretti:

1) l'analisi delle interazioni mareali del Sole sulle comete che lo sfiorano al perielio (la famiglia Kreutzer, scoperta dalla sonda SOHO); [continua...]



STRUTTURA DEL NUCLEO - 2

2) L'analisi dei periodi di rotazione dei nuclei cometari (ancora pochi dati);

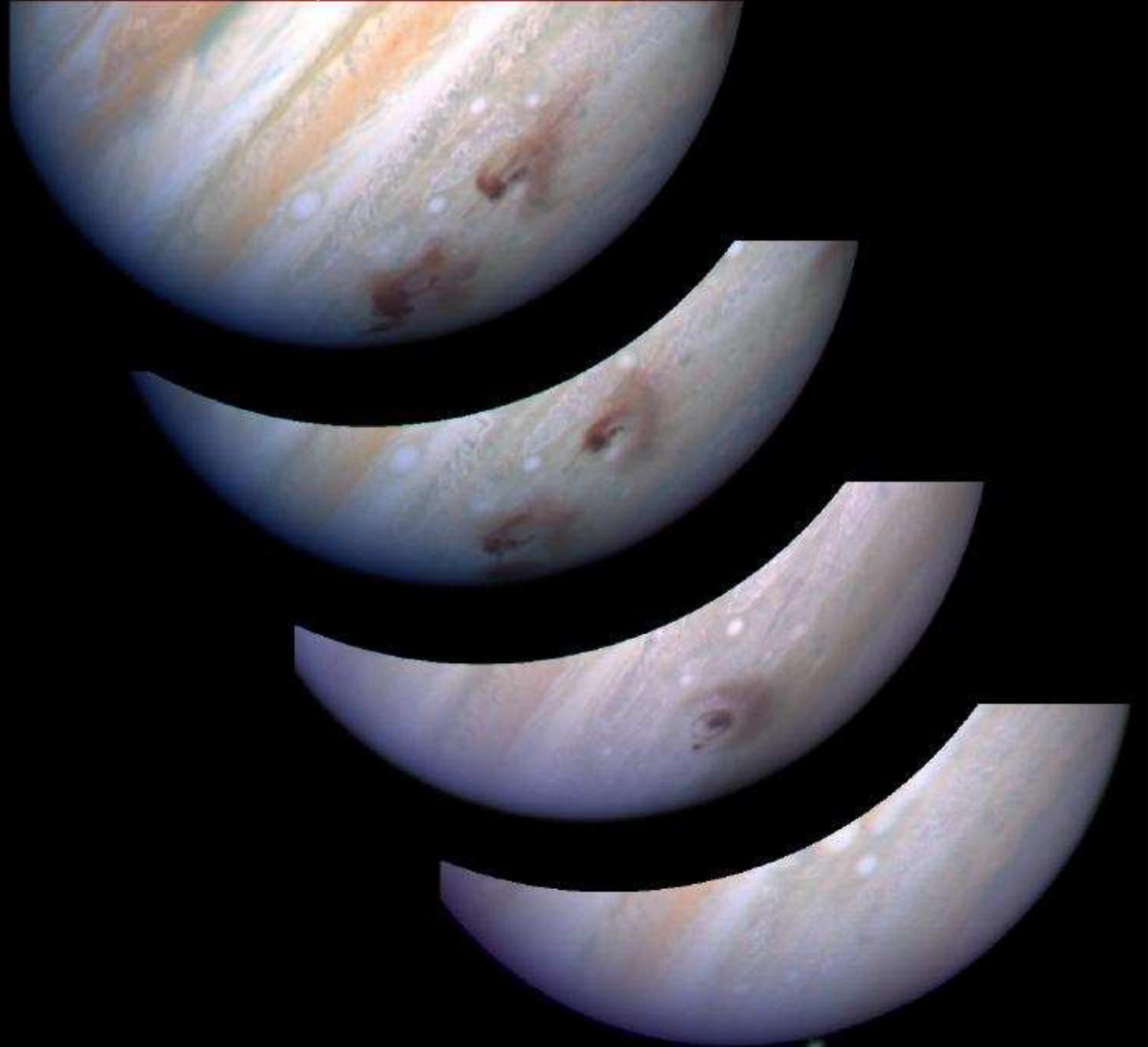
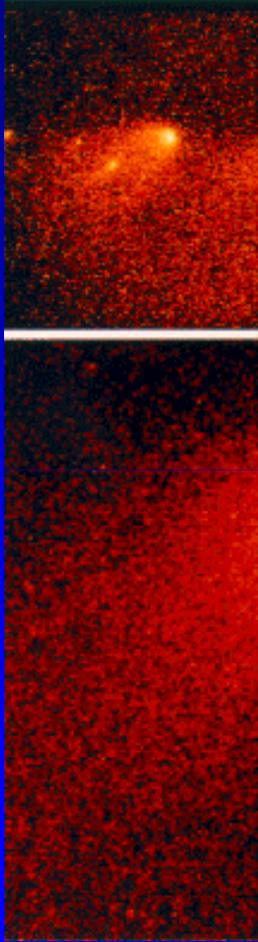
3) Lo studio delle traiettorie degli sciami meteoritici associati a comete, quando essi giungono nell'atmosfera terrestre.

Valori ricavati: 100 – 10000 Newton/m², che corrispondono a un carico di rottura rispettivamente di 1 – 100 grammi per ogni cm². Le comete non sono molto compatte, e anche la compressione dovuta alla loro stessa gravità non cambia sostanzialmente la situazione.

Anche se non c'è molta coesione il nucleo non è certo un mucchio di sassi, ma un corpo centrale ben definito. Le immagini delle sonde ne hanno evidenziato la forma irregolare, i getti di gas che escono apparentemente a caso dalla superficie, zone inattive di colore molto scuro, crateri, rilievi e depressioni.

Le piccole dimensioni dei nuclei cometari (sotto i 100 km) fanno pensare che non vi sia alcuna differenziazione interna in nucleo e mantello, come per i pianeti. Dovrebbe trattarsi di strutture OMOGENEE

La cometa Shoemaker-Levy 9 si schianta su Giove



*Un altro esempio di frammentazione del nucleo: la
cometa 73P/Schwassman-Wachmann 3*



(Immagini dell'HST dei frammenti B e G)

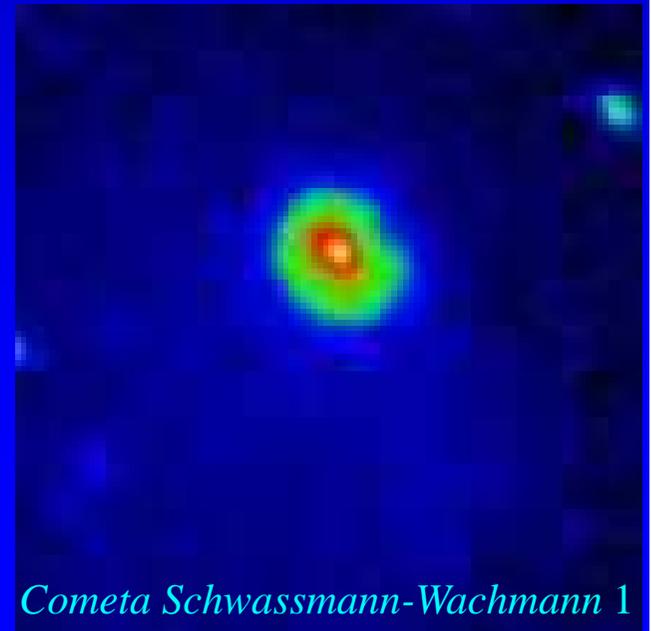
GLI “OUTBURSTS” DEL NUCLEO

Si osservano spesso rapidi incrementi nell'emissione (OUTBURSTS), che possono accrescere la luminosità anche di 100 volte. Dopo il parossismo si forma una chioma temporanea, che svanisce nel giro di poche settimane.

Una possibile spiegazione è che gli outbursts dipendano da reazioni chimiche esotermiche, con l'azione di radicali liberi su sacche di gas imprigionate sotto la crosta del nucleo: l'energia liberata potrebbe aumentare la pressione fino al verificarsi delle esplosioni. Per esempio, la transizione di fase dal ghiaccio amorfo a quello cristallino ($a \sim 140$ K, ovvero -130 °C) è un processo che fornisce 24 calorie per ogni grammo.

Un'altra possibile sorgente di energia è la rapida sublimazione di CO_2 o CO solidi imprigionati nel reticolo cristallino del ghiaccio d'acqua.

Può darsi che processi di tipo diverso siano all'opera su diverse comete, o anche sulla stessa cometa in tempi diversi.



Cometa Schwassmann-Wachmann 1

LE DIMENSIONI DEL NUCLEO

Non sono possibili misure dirette dalla Terra, perché il nucleo è troppo piccolo; si ricorre allora a misure fotometriche quando il nucleo è inattivo, cioè lontano dal Sole.

Questo metodo dà valori compresi tra 1 e 10 km; si ritiene però che le dimensioni possano essere anche maggiori, fino a circa 100 km (per esempio per la cometa Hyakutake).

La prima misura diretta è stata invece effettuata nel 1986 dalla sonda Giotto sul nucleo della cometa di Halley, che è apparso come una “patata” irregolare di 16 x 8 x 7,5 km. In passato il nucleo doveva anche essere più grande, poi i molti passaggi lo hanno “consumato”.



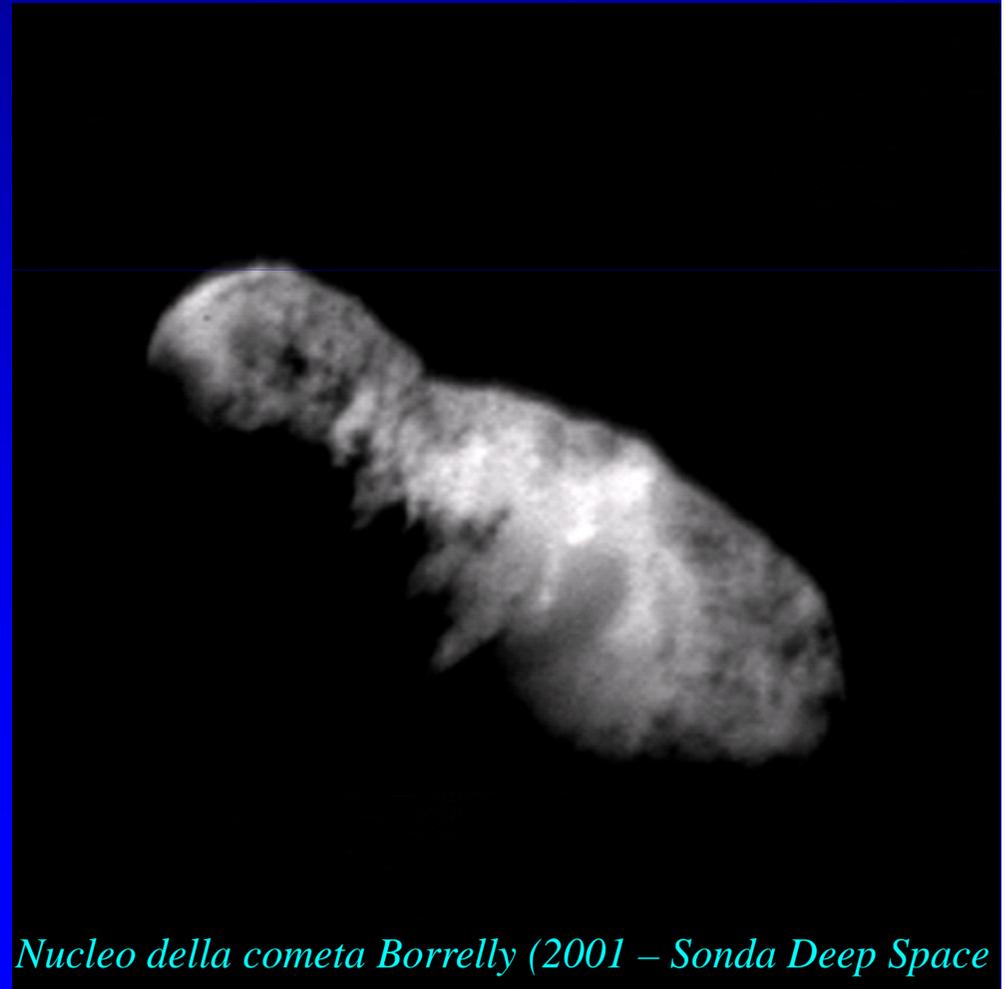
Nucleo della cometa di Halley

TEMPERATURA E COLORE

Misure della temperatura del nucleo hanno fornito valori di 300 K - 400 K (da 30° C a 130° C), ben più alti del valore teorico di 190 K (-180° C), calcolato sul tasso di evaporazione del ghiaccio cometario ad opera dell'irraggiamento del Sole.

La discrepanza potrebbe essere spiegata dalla presenza di una crosta superficiale molto scura, formata da un miscuglio di vari composti organici (detti kerogeno, o CHON) "cotti" dalla radiazione solare.

Il risultato è che una cometa lontana dal Sole e inattiva appare più nera dell'inchiostro, nonostante sia in gran parte composta di ghiaccio d'acqua. Solo quando essa si avvicina al Sole le cose cominciano a cambiare.



Nucleo della cometa Borrelly (2001 – Sonda Deep Space

DENSITÀ E ROTAZIONE DEL NUCLEO

Anche le misure di densità sono molto difficili (tanto per cambiare). La procedura più usata è quella di determinare prima una stima della massa del nucleo sfruttando l'effetto perturbativo delle forze non gravitazionali (quelle dovute all'emissione di gas e polveri), che agiscono sul nucleo modificandone l'orbita. Per ottenere la densità occorre poi un valore attendibile delle dimensioni del nucleo... e non è difficile immaginare quanto grande sia l'errore sulla misura finale.

Valori ricavati: $0,1 \text{ g/cm}^3$ (cometa Kopff), $0,54 \text{ g/cm}^3$ (cometa Tempel 2), $0,19 \text{ g/cm}^3$ (cometa Giacobini-Zinner). Sono valori bassi, indizio di una struttura quasi spugnosa.

Le misure di rotazione dei nuclei cometari forniscono valori compresi tra alcune ore e alcuni giorni, ma la loro attendibilità è ancora piuttosto incerta.



Due immagini del nucleo della cometa Wild

COMPOSIZIONE CHIMICA DEL NUCLEO

Lo studio si basa sull'analisi spettroscopica della chioma. Le abbondanze chimiche, almeno per la cometa di Halley, risultano molto simili a quelle solari, con l'eccezione dell'idrogeno (meno del Sole) e del carbonio, che si trova in gran parte sotto forma di composti organici complessi (CHON).

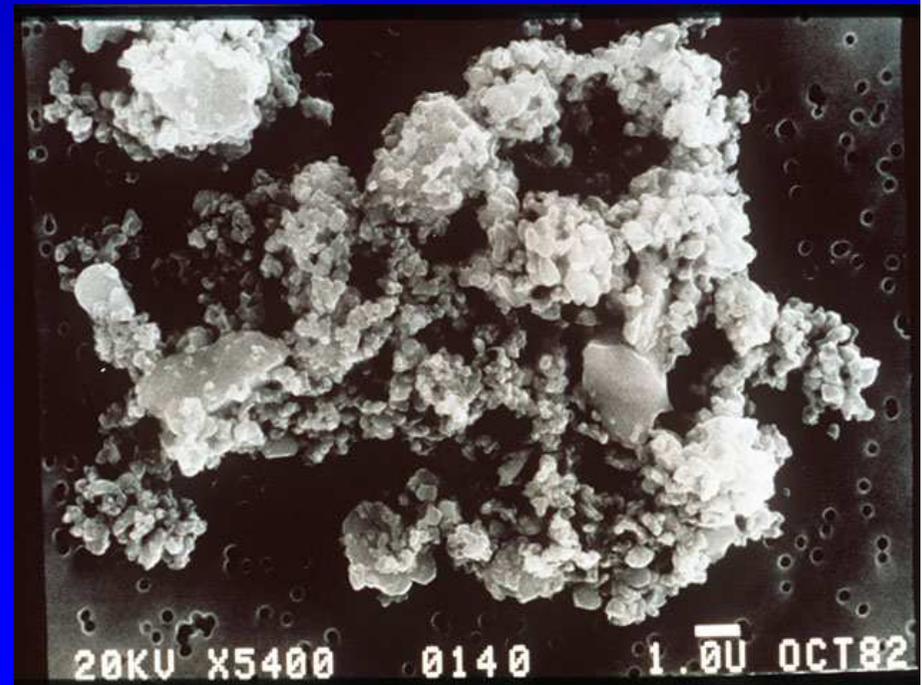
Particolarmente interessante è lo studio delle abbondanze isotopiche. Il nucleo di ogni elemento chimico ha un numero sempre uguale di protoni, ma i neutroni possono variare di numero, creando ISOTOPI dello stesso elemento (per esempio, il carbonio 12, 13 o 14, che ha rispettivamente 6, 7 e 8 neutroni)

Il rapporto $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ sembra più basso del corrispondente valore osservato per il materiale interstellare (quello, cioè, che dovrebbe aver formato il Sistema Solare).

Quindi l'idea

*“materiale cometario = nebulosa
protosolare = materiale interstellare”*

*non sembra proprio esatta; occorrono
comunque ancora molti altri dati.*



GRANO di probabile origine cometaria

ABBONDANZE ISOTOPICHE E CHIMICHE

Sembra che il rapporto più basso $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ rilevato per la materia interstellare sia dovuto all'incremento dell'isotopo più pesante nelle nubi interstellari, causato dall'immissione di materiale elaborato da stelle in fase di evoluzione avanzata.

Gli altri valori delle abbondanze isotopiche (con l'eccezione del rapporto deuterio/idrogeno D/H) sono abbastanza simili a quelli solari.

È praticamente impossibile elencare in poco spazio tutti composti organici individuati nelle comete.

A parte CH_4 , CO , CO_2 (molto comuni) ricordiamo soltanto:

*CH , C_2H_2 , C_2H_6 , CN , HCN , HCNO , H_2CO , CH_3OH , CS , CS_2 ,
 OCS .*

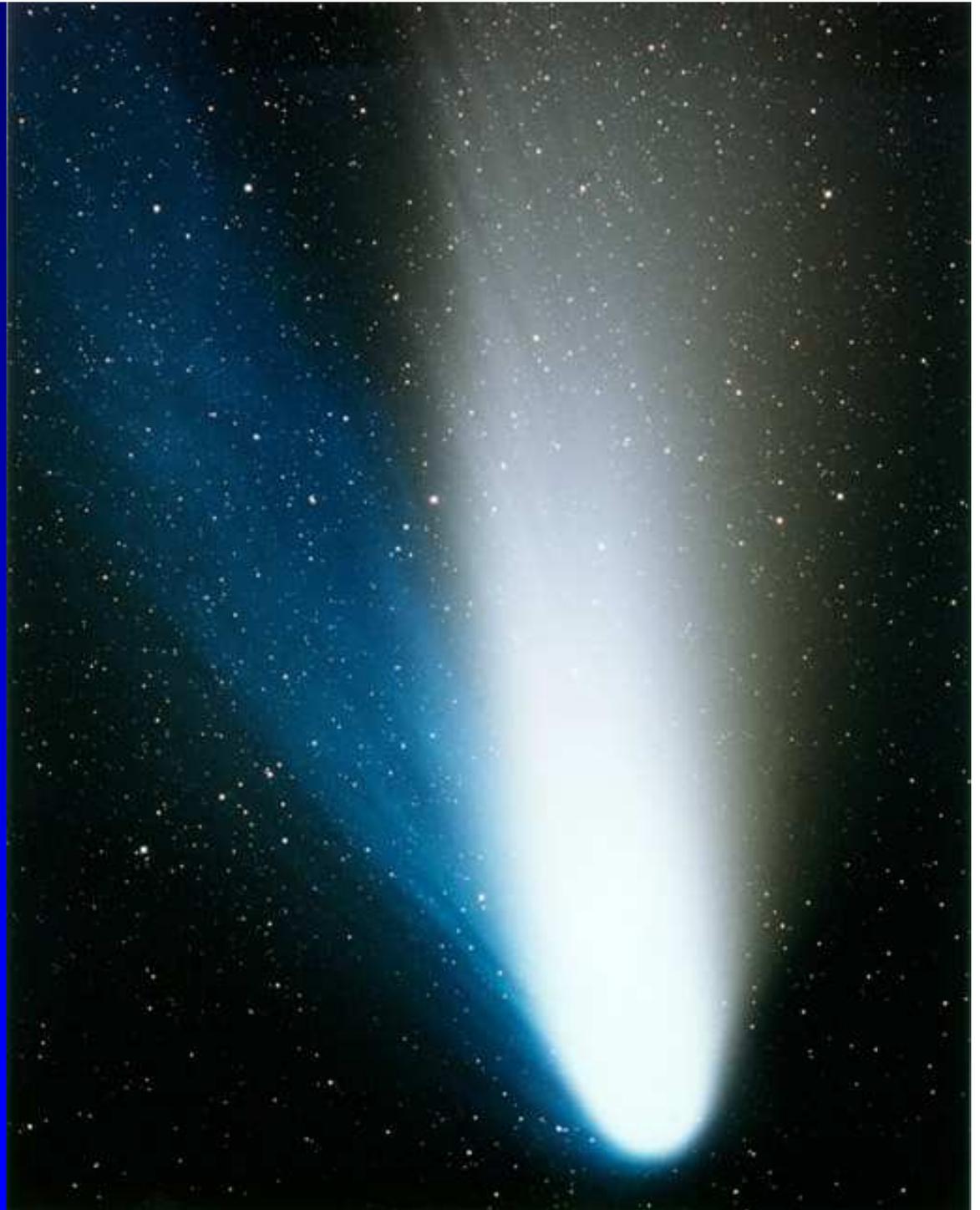
e, tra le varie specie non organiche:

NH , NH_2 , NH_3 , NO , H_2S , SO_2 , Ca , Ni , Fe , Cr , Mn , Co ,

Cu , S_2 , K , Na .



COMETA
HALE-BOPP
(1996 – 1997)



COMETA McNaught



*Il 12 gennaio 2007
è passata al
perielio a 25
milioni di km dal
Sole*

*La cometa McNaught
dall'emisfero sud*



ACQUA DALLE COMETE?

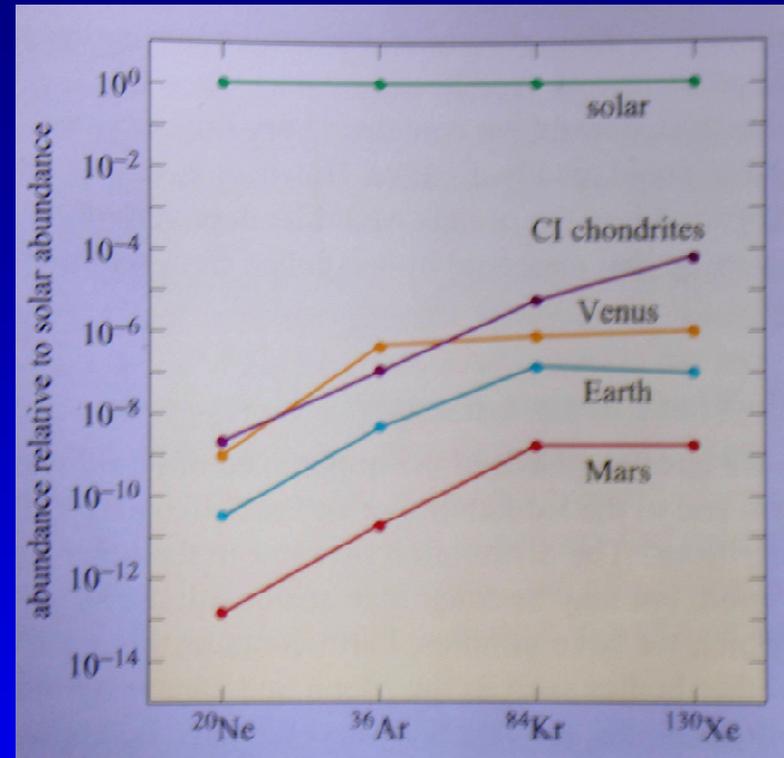
*La distribuzione dell'acqua nel Sistema Solare primitivo è legata in generale a quella dei cosiddetti elementi **VOLATILI**: H_2O , N_2 , CO_2 e i gas nobili Ne, Ar, Kr, Xe.*

*Le abbondanze terrestri degli elementi volatili mostrano che c'era **poca acqua** nella zona di formazione del nostro pianeta.*

Sono allora due le ipotesi plausibili:

a) minerali ad alto contenuto d'acqua sono stati incorporati nella Terra in formazione

b) numerosi impatti di comete hanno arricchito il nostro pianeta di acqua (e di composti organici)



ACQUA DALLE COMETE?

Non si può ancora scegliere in modo sicuro tra le ipotesi a) e b), ma una risposta passa per lo studio dei nuclei cometari (Hyakutake e Halley) raggiunti dalle nostre sonde.

Una “firma” importante: il deuterio, D (nucleo di idrogeno arricchito di un neutrone) contenuto nell’acqua.

Il rapporto delle concentrazioni deuterio/idrogeno [D/H] è un buon indice della provenienza dell’acqua.



Corpo celeste	Rapporto D/H
Terra	$1,5 \cdot 10^{-4}$
C. Halley	$3,16 \cdot 10^{-4}$
C. Hyakutake	$2,82 \cdot 10^{-4}$

Resta ancora moltissimo lavoro da fare per chiarire la questione, che è di importanza fondamentale per la comprensione di come la vita sia nata sulla Terra.



FINE

