

Il 99.86% della massa del Sistema Solare è concentrata nel Sole. Il resto sta nei pianeti, soprattutto Giove. Ma esistono anche corpi più piccoli, **nano-pianeti** e **corpi minori**, che non per questo sono meno interessanti.

# Definizione di Nano-Pianeta

Un Nano-Pianeta è un corpo celeste che:

1. E' in orbita intorno al Sole.
2. Ha massa sufficiente affinché la sua auto-gravitazione possa vincere le forze di corpo rigido, in modo da assumere una forma di equilibrio idrostatico.
3. Non ha ripulito i dintorni della sua orbita.
4. Non è un satellite.

**I nano-Pianeti (più la nostra Luna, 3475 km di diametro, per un confronto delle dimensioni)**



# I cosiddetti Corpi Minori, o Piccoli Corpi del Sistema solare



asteroidi

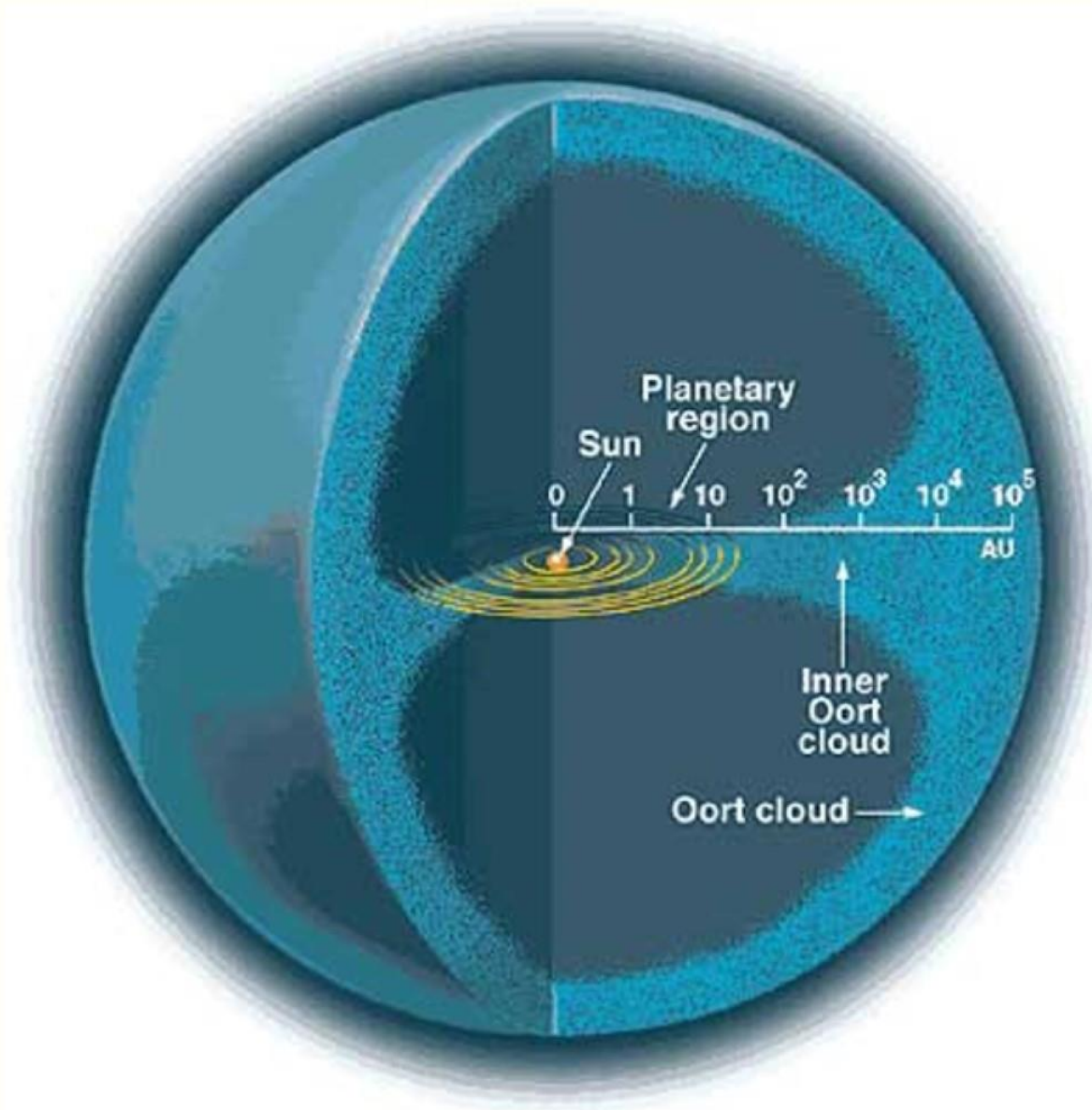


comete

polveri

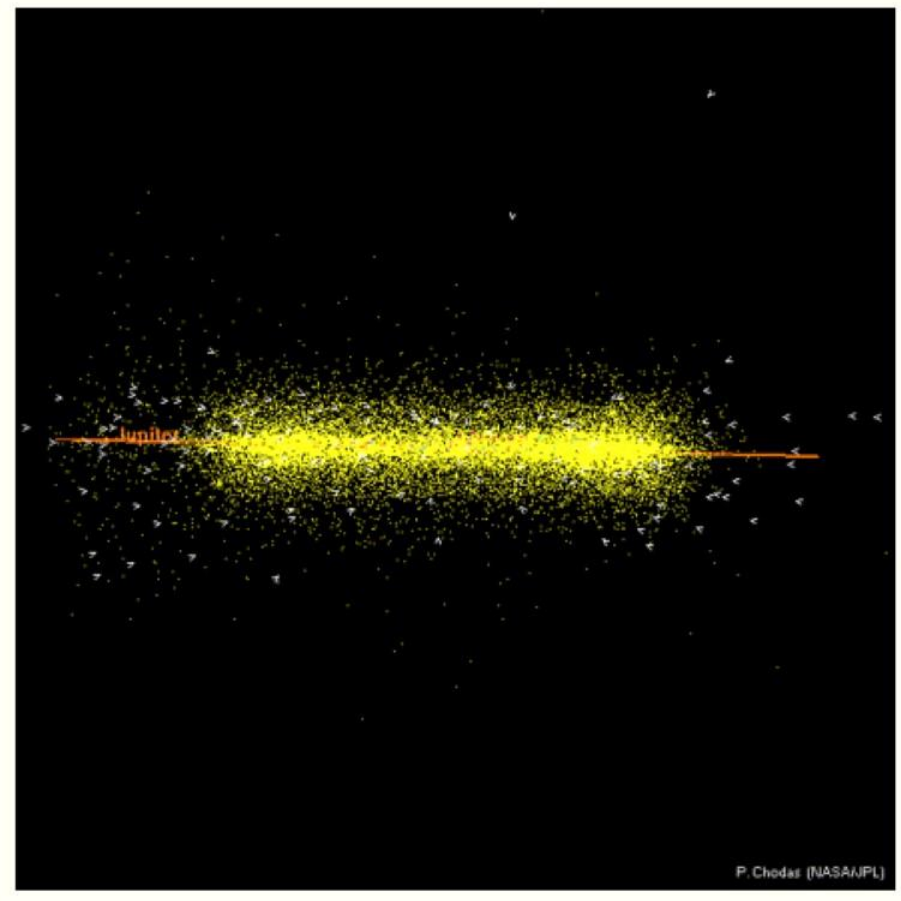
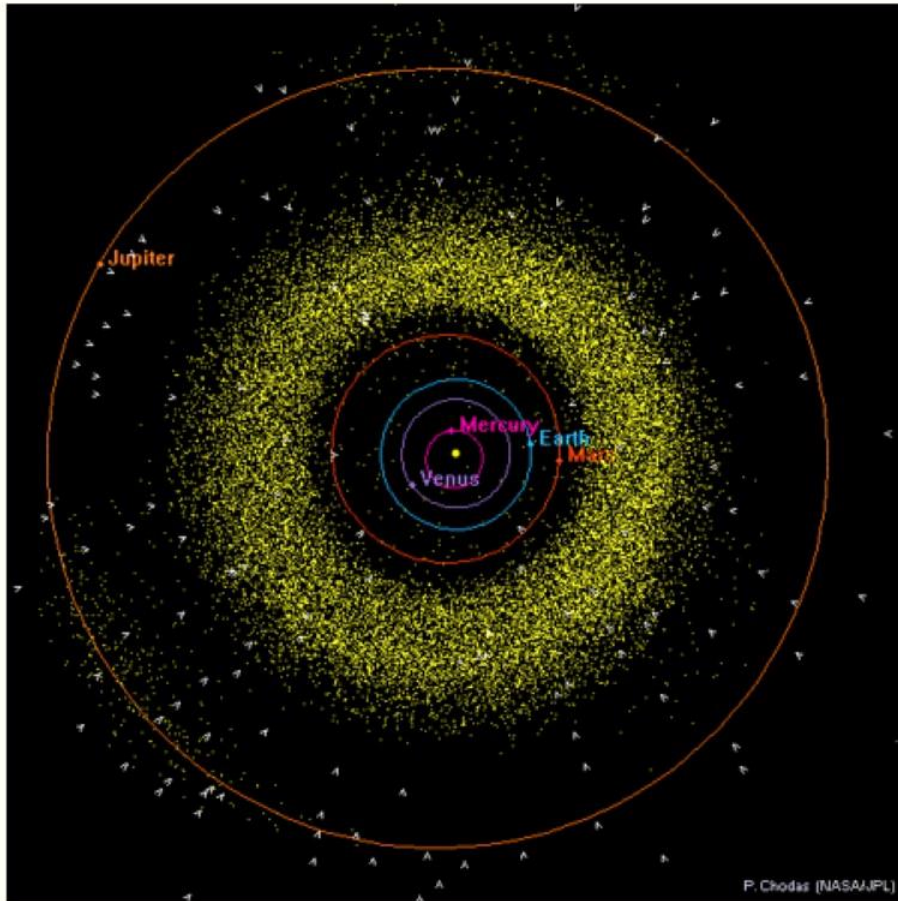


Meteoroidi e meteoriti



Le differenze più importanti tra i diversi tipi di corpi minori sono dovute principalmente alle differenze in distanza dal Sole e alle corrispondenti differenze nelle abbondanze di elementi volatili (ghiacci) nelle loro composizioni.

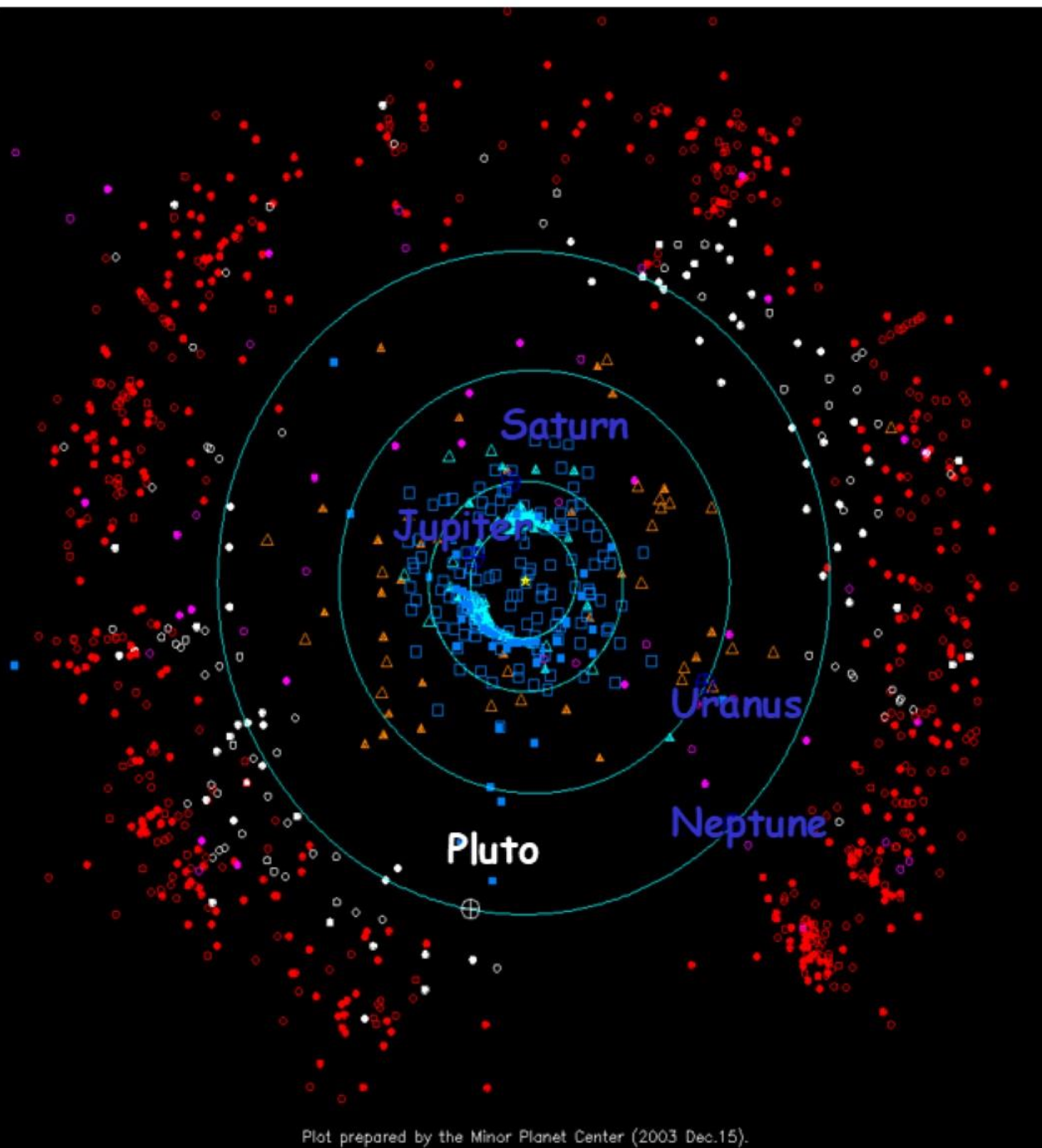
# La fascia principale degli asteroidi e I "Troiani" di Giove



# Kuiper belt:

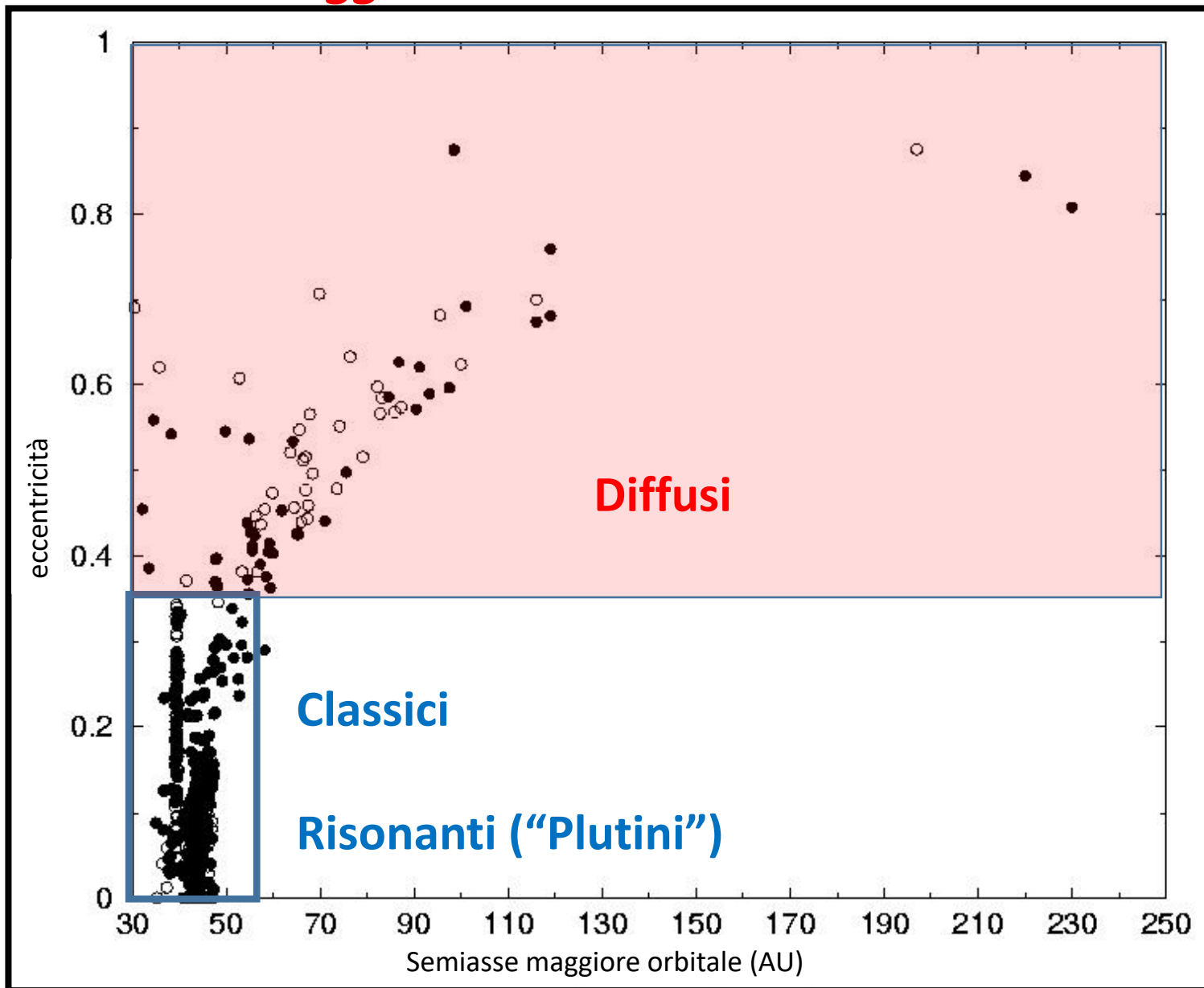
Oggetti conosciuti: ~1000

Numero stimato >100000  
con  $D > 1$  km



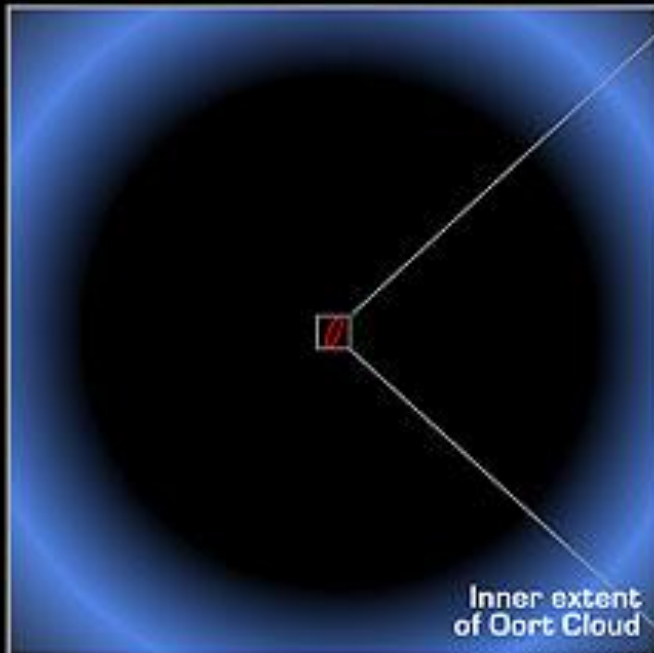
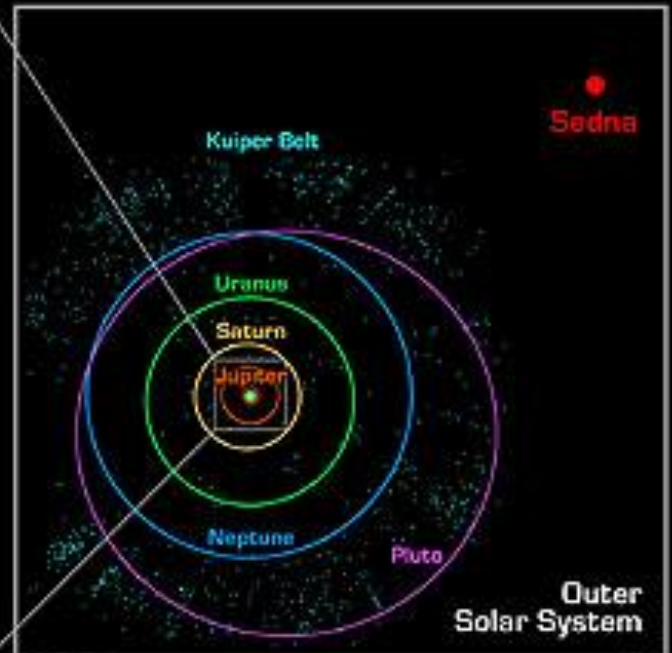
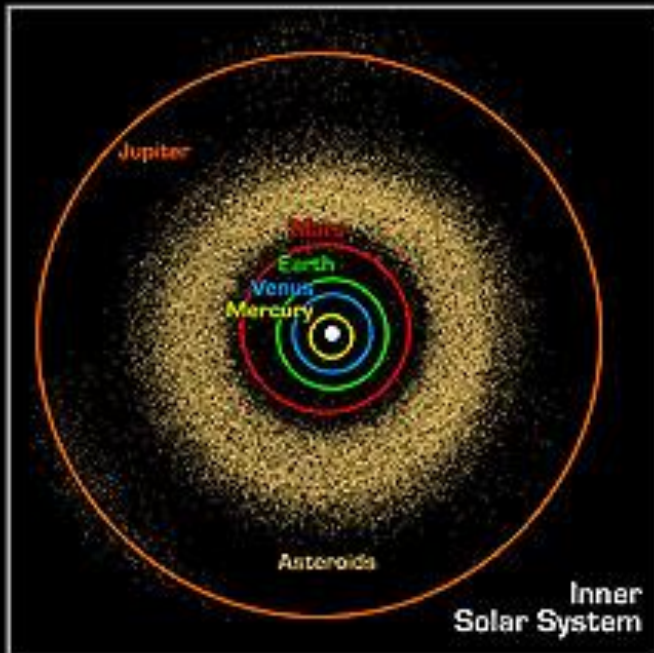
- Classici
- Plutini
- Diffusi
- ▲ Centauri
- Comete a corto periodo

# Gli oggetti Trans-Nettuniani





**Oggetti  
diffusi della  
fascia di  
Kuiper:  
oggetti molto  
distanti !**



**Sedna:**

$a = 532 \text{ AU}$   
 $\text{per.} = 76 \text{ AU}$   
 $\text{aph.} = 988 \text{ AU}$   
 $H = 1.8$   
 $D \sim 1500 \text{ km}$

# Le comete: piccoli corpi del sistema solare esterno

## Nucleo cometario:

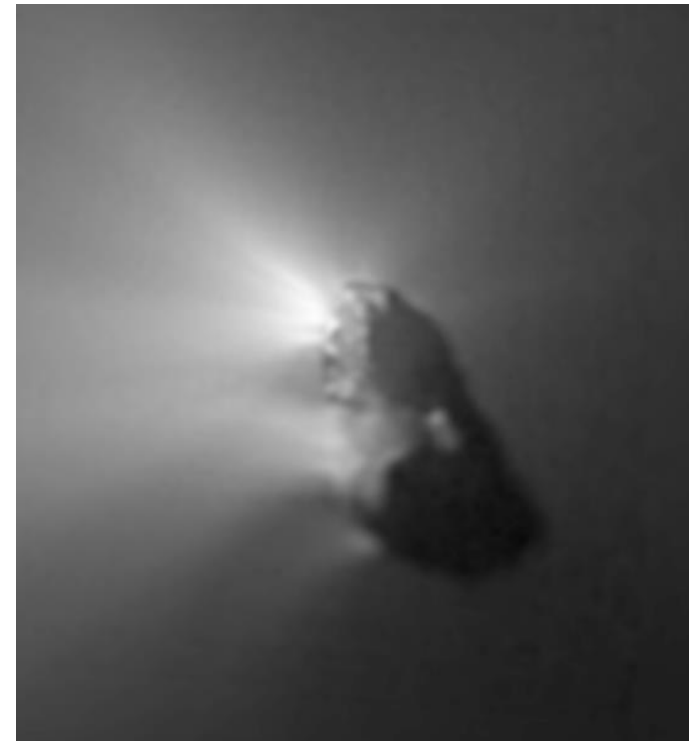
Dimensioni tipiche 1-50 km, costituito da materiale che include grandi proporzioni di ghiacci (composti volatili).

Densità incognita (ma bassa)

Fragile!

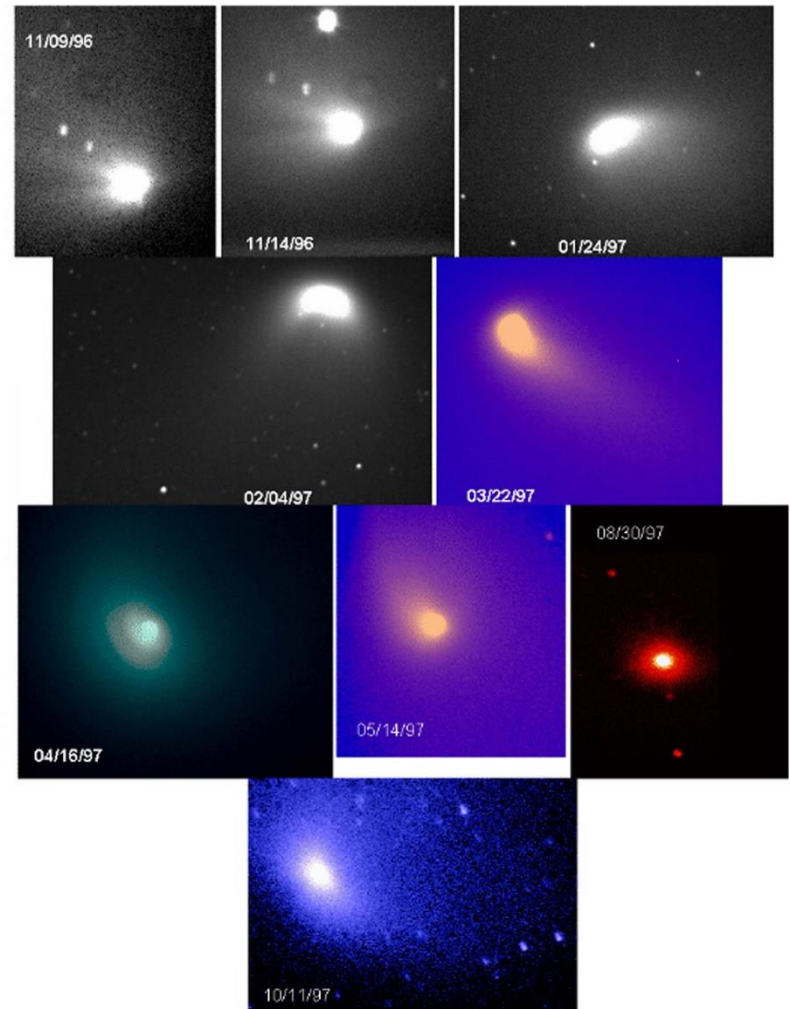
Albedo (rapporto luce diffusa/incidente) = 4%

Il nucleo della cometa di Halley fotografato dalla sonda Giotto.



Quando il nucleo  
si avvicina al Sole  
i suoi ghiacci  
vaporizzano,  
sollevando anche  
parecchia polvere,  
e vanno a formare  
la Chioma

- Costituita da gas e polvere
- Dimensioni tipiche 100000 km.
- Densità bassissime



HALE-BOPP by ALBERTO QUIJANO VODNIZA - UNIVERSITY OF PUERTO RICO ( R.U.M )

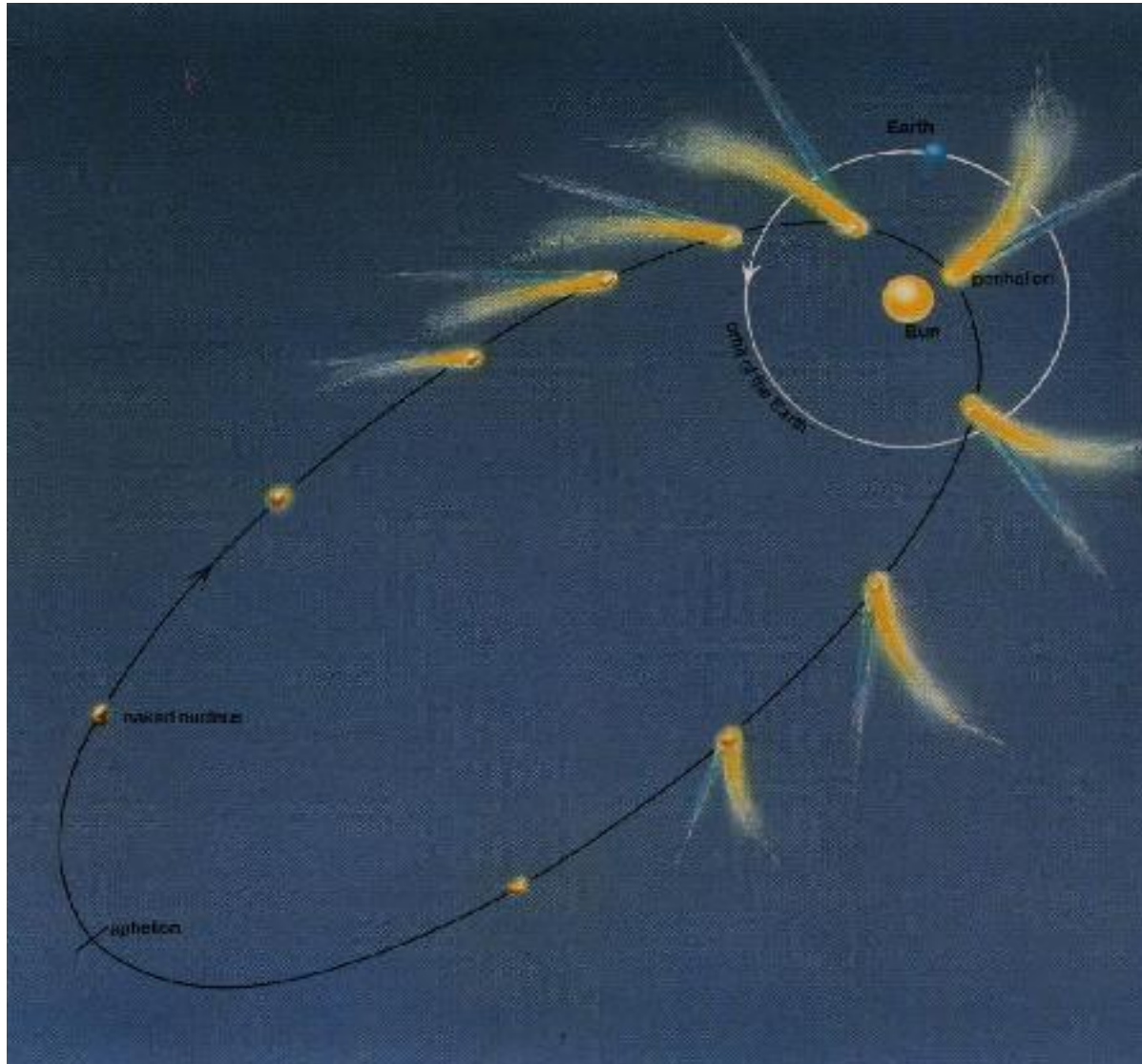
...La quale  
chioma, sotto  
l'effetto della  
radiazione e del  
vento solare, va  
a formare la  
Coda.

**Per farsi un'idea: se il nucleo fosse grande come una moneta da 2 Euro, la coma avrebbe il diametro di 1 km e la coda si estenderebbe su una distanza simile a quella tra Milano e Salerno.**

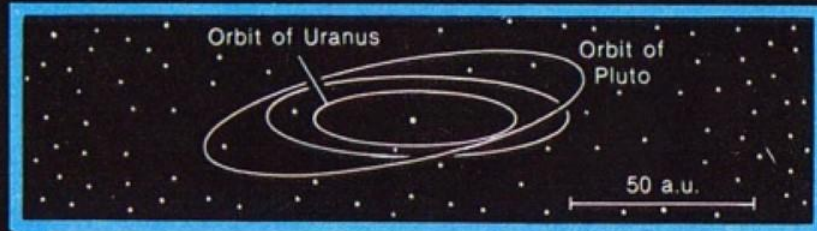
dimensioni tipiche: 10-100  
Milioni di km



Due classi principali di comete: a Lungo Periodo ( $P > 200$  anni) ed a Corto Periodo ( $P < 200$  anni).

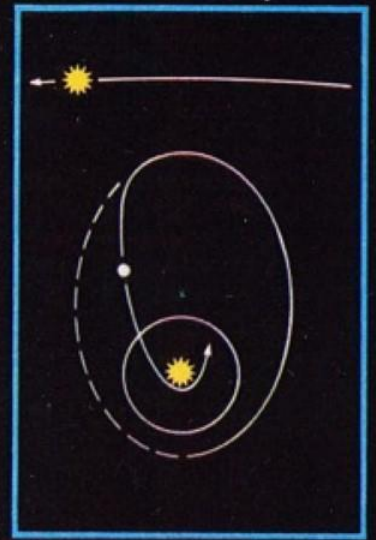
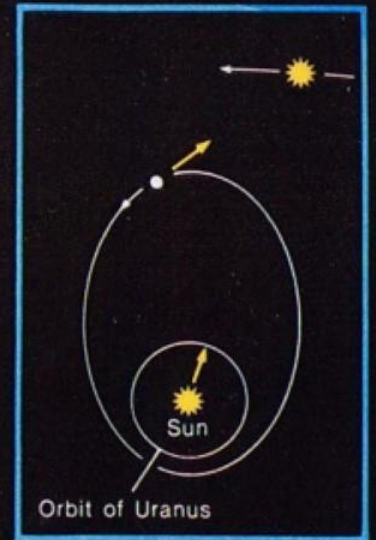


# L'origine delle comete a lungo periodo dalle nubi di Oort



50,000 a.u.

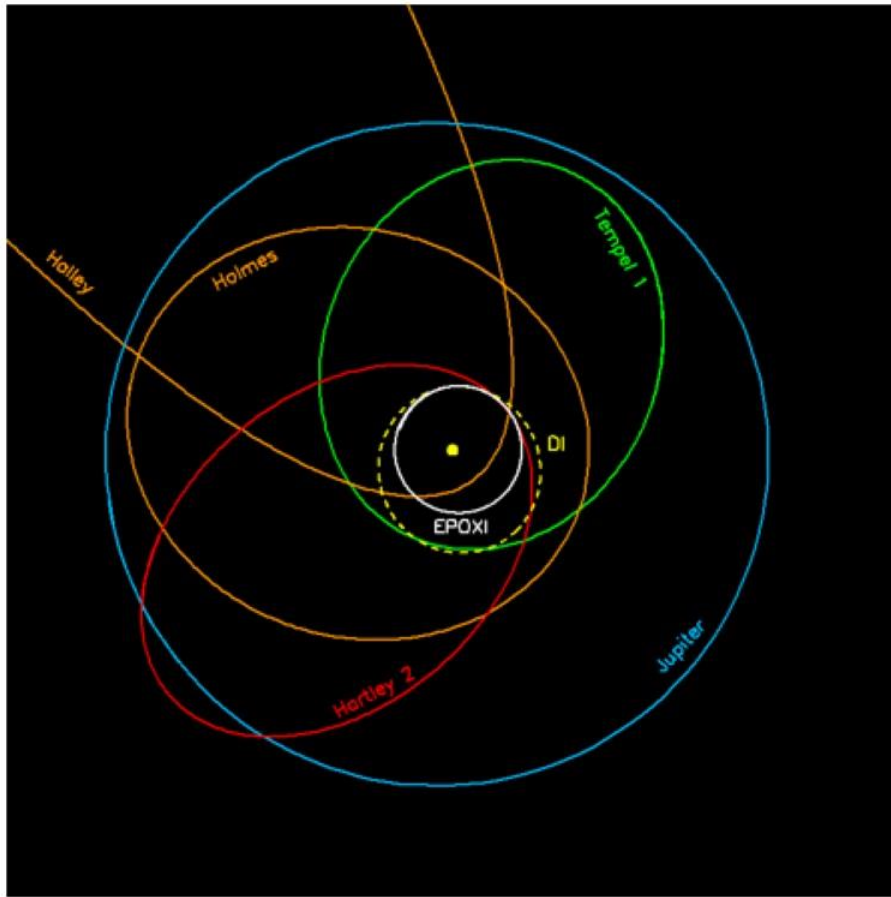
A scale bar indicating 50,000 astronomical units (a.u.).



The Oort  
Comet Cloud

To Galactic Pole

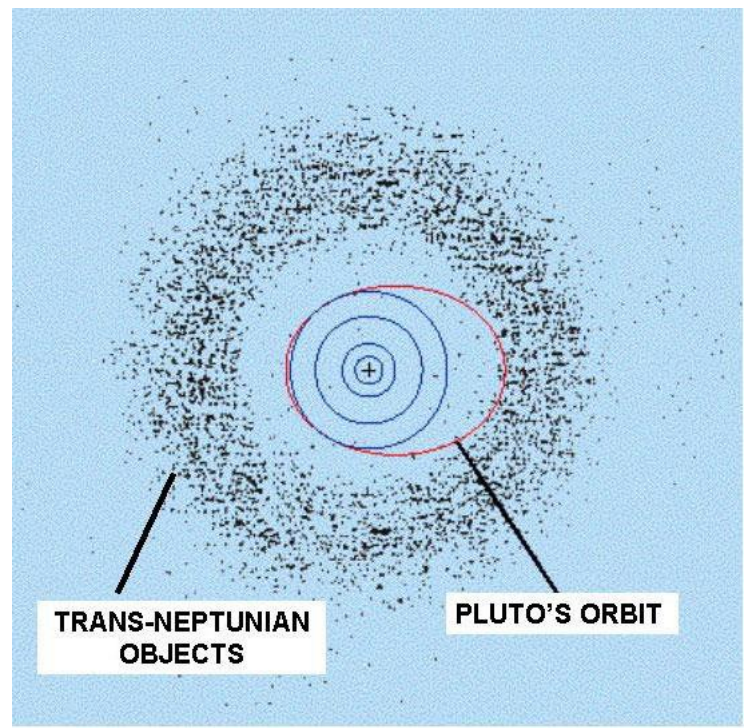
An arrow pointing towards the Galactic Pole.

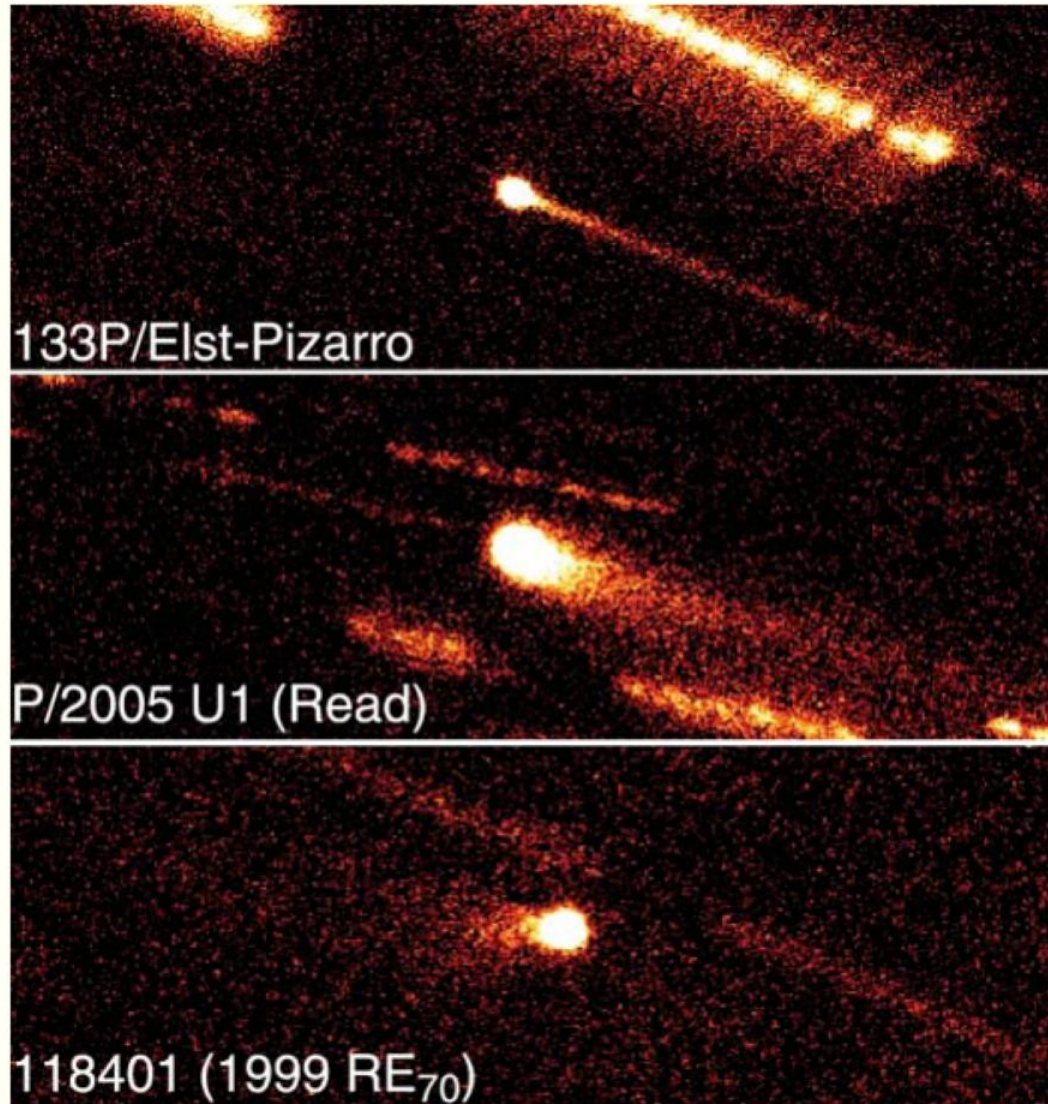


Le orbite di alcune comete a breve periodo

Comete con periodi orbitali minori di 20 anni e piccole inclinazioni orbitali (fino a 30° dall'eclittica) sono tradizionalmente chiamate **comete della famiglia di Giove**

Problema di giustificare l'abbondanza osservata di comete a corto periodo, su orbite poco inclinate. Ipotesi dell'esistenza di una "fascia" di oggetti Trans-nettuniani, poi confermata dalle osservazioni.





Le differenze tra comete ed asteroidi possono essere meno evidenti di quanto siamo abituati a pensare!

Ne fa prova la recente scoperta delle cosiddette "main-belt comets", asteroidi che mostrano attività cometaria



(433) Eros: 31 X 13 X 13 Km

Punto di atterraggio della sonda  
NEAR

Qui, ci concentreremo soprattutto  
sugli asteroidi, i corpi minori che  
orbitano principalmente alle distanze  
eliocentriche tra Marte e Giove.



## Una vecchia storia: la “legge” di Titius-Bode:

$$D_n = 0.4 + 0.3 \cdot 2^n \quad n = -\infty, 0, 1, 2, 3, \dots$$

$$D_{-\infty} = 0.4 \quad a \text{ (Mercurio)} = 0.39 \text{ UA}$$

$$D_0 = 0.7 \quad a \text{ (Venere)} = 0.72 \text{ UA}$$

$$D_1 = 1.0 \quad a \text{ (Terra)} = 1.00 \text{ UA}$$

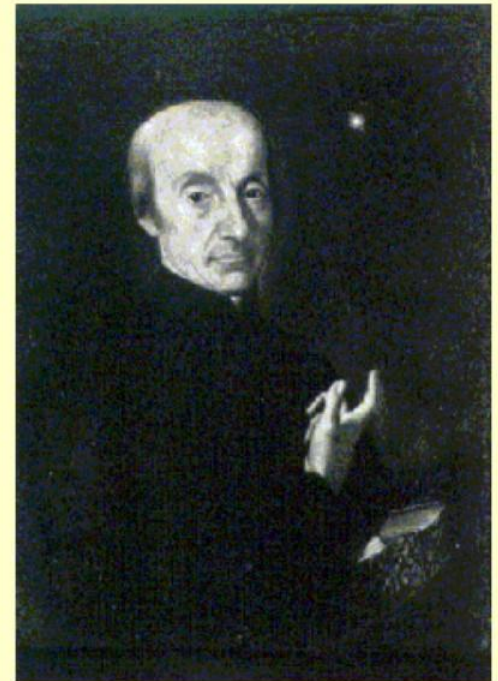
$$D_2 = 1.6 \quad a \text{ (Marte)} = 1.52 \text{ UA}$$

$$D_3 = 2.8 \quad a \text{ (??)} = 2.8 \text{ UA}$$

$$D_4 = 5.2 \quad a \text{ (Giove)} = 5.20 \text{ UA}$$

$$D_5 = 10.0 \quad a \text{ (Saturno)} = 9.54 \text{ UA}$$

$$D_6 = 19.6 \quad a \text{ (Urano)} = 19.18 \text{ UA}$$



$a(\text{Cerere}) \sim 2.8 \text{ AU}$

Di quali distanze stiamo parlando? Su scala astronomica sono senza dubbio modeste, ma come possiamo farcene un'idea?

Immaginiamo di prendere il Sole (diametro: 1392000 km)



E riduciamolo alle dimensioni di un pallone di calcio (22 cm)



## Se facciamo così:

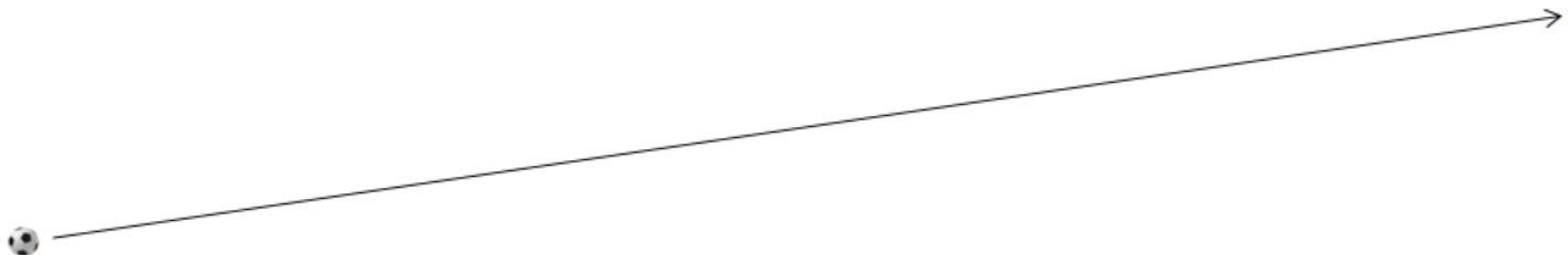
La nostra Terra  
(12750 km di  
diametro)




Diventa una  
lenticchia  
(diametro 2  
mm)



Essa orbita a una distanza (un'Unità Astronomica, pari a 149.600.000 km), che equivale alla nostra scala a 23.6 metri.



**Giove**  diventa una biglia di un paio di cm (11 volte il diametro terrestre) e dista 123 metri dal nostro Sole in miniatura

**Un anno luce (9461 miliardi di chilometri, pari a circa 63241 Unità Astronomiche) diventa equivalente a 1495 km se riduciamo il Sole ad un pallone da calcio**

**Le estreme propaggini del Sistema Solare arrivano a 100000 Unità Astronomiche (2350 km alla nostra scala)**

**La stella più vicina (4.3 anni luce) alla nostra scala si trova a 6430 km dal nostro “pallone”**

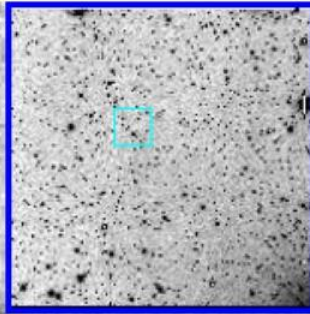
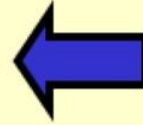
**La Via Lattea, che contiene 100 miliardi di “palloni” più o meno grandi, e ha un diametro di 100000 anni luce, si estende alla nostra scala su 15 milioni di chilometri.**

**Le galassie più vicine si trovano a milioni di anni luce...**

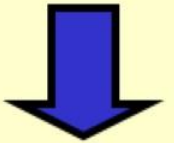
# Una fondamentale premessa riguardo agli asteroidi

- **Gli asteroidi sono corpi rocciosi**
- **Gli asteroidi non sono solo dei grossi sassi come alcune persone pensano**
- **Le rocce sono aggregati di minerali**
- **I minerali sono composti chimici allo stato solido**
- **Gli asteroidi hanno dietro di sé una lunga storia e la loro origine risale agli albori della formazione ed evoluzione del nostro Sistema Solare**

C'è voluto molto tempo per passare da questo ...



... a questo



... Ma c'è ancora molto da fare e da capire!

753.72 1283.23 1606.4

Ci sono due ragioni principali per voler studiare gli asteroidi



Interesse puramente scientifico



Le interazioni col nostro pianeta





## **Che cosa vogliamo capire:**

- **di che cosa sono fatti**
- **che strutture hanno**
- **che età hanno**
- **la loro storia**
- **la loro evoluzione nel tempo**
- **quanti ce ne sono, e come sono distribuiti**
- **che cosa possono dirci sulla storia del Sistema Solare**

# Tecniche di osservazione remota

- **Astrometria**
  - **Fotometria UBVRI**
  - **Fotometria IR (Radiometria Termica)**
  - **Polarimetria**
  - **Spettrofotometria e Spettroscopia**
  - **Radar**
  - **Immagini ad alta risoluzione**
  - **Occultazioni**
- + **Missioni Spaziali (esplorazione *in situ*)**

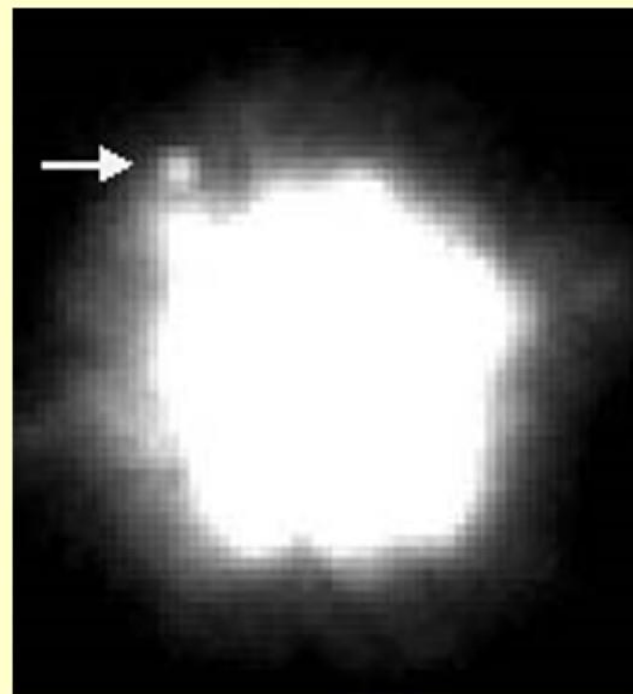


# Immagini ad alta risoluzione: La scoperta dei sistemi binari di asteroidi.

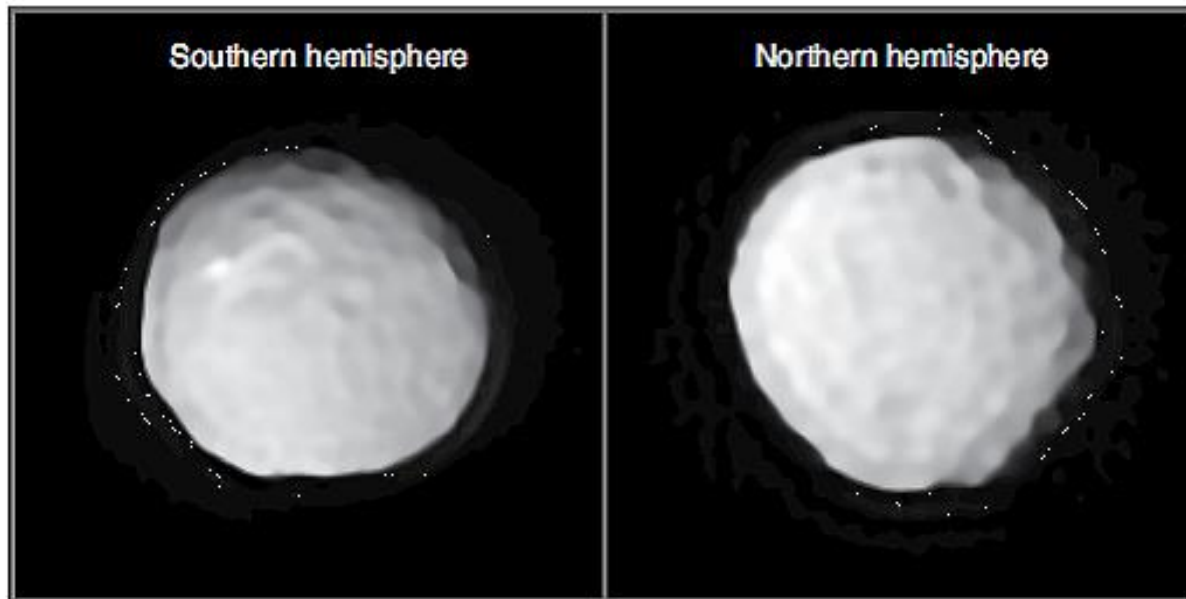
Anche con i telescopi più potenti, tuttavia, la stragrande maggioranza degli oggetti è troppo piccola e debole per essere risolta



⇐ 90 Antiope, 45 Eugenia



In anni recenti si sono avuti grandi progressi nelle tecniche di *imaging* con ottica adattiva.



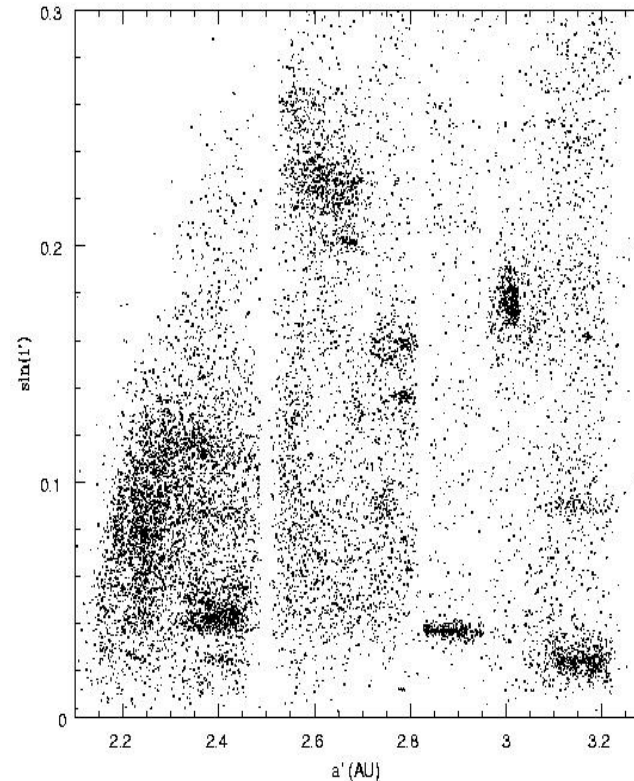
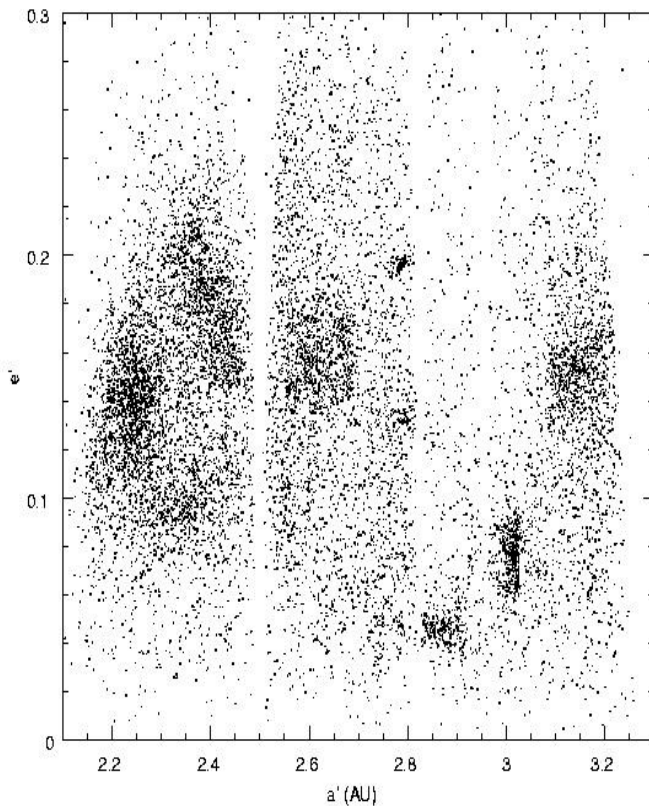
(2) Pallas

Marsset et al., Nature Astronomy 4, 569-576 (2020)

... ma tutto ciò si si può fare solo per un numero molto limitato di oggetti di dimensioni di diverse decine o centinaia di chilometri.

# Astrometria: La più importante fonte di dati.

Permette di determinare le orbite. Gli oggetti della fascia principale **non** sono distribuiti in modo uniforme nello spazio degli elementi orbitali propri.



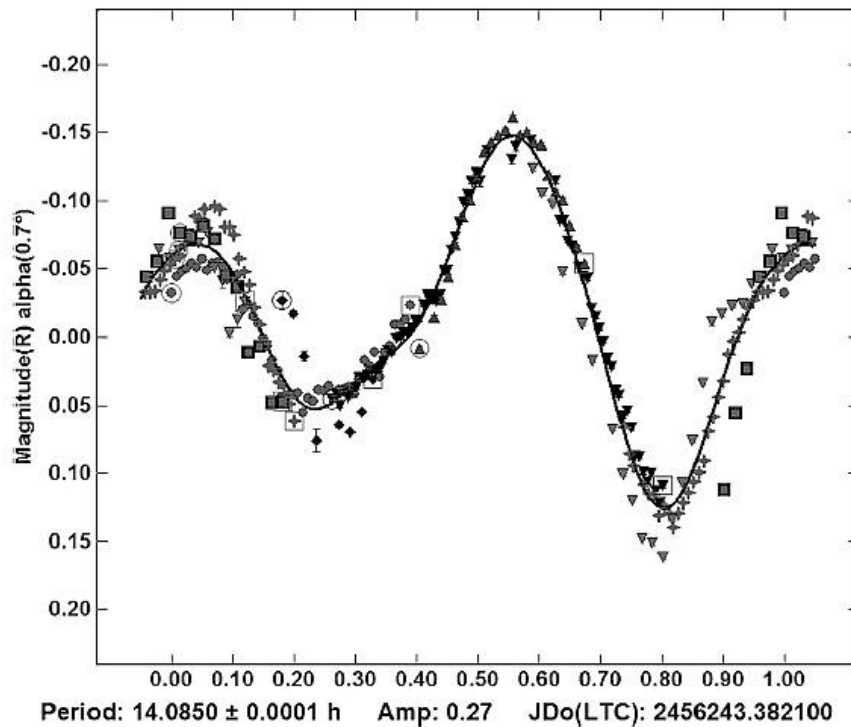
“Lacune” di Kirkwood e famiglie dinamiche

Secondo la statistica, queste famiglie non possono essere dovute al caso!

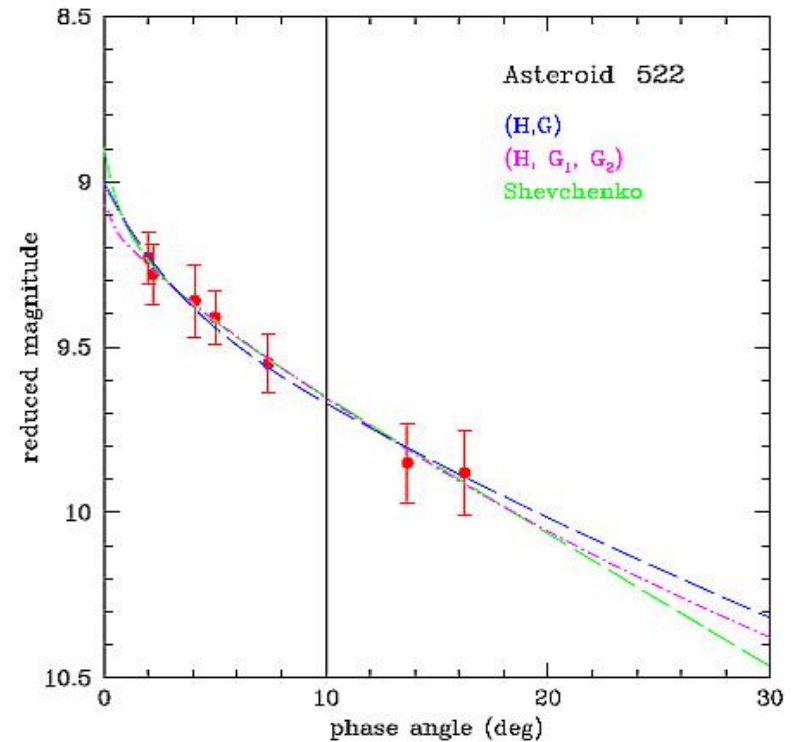
(I dati mostrati si riferiscono alla situazione nel 1994-1995)

# Fotometria: la seconda più importante sorgente di informazioni.

## “Curve di luce”

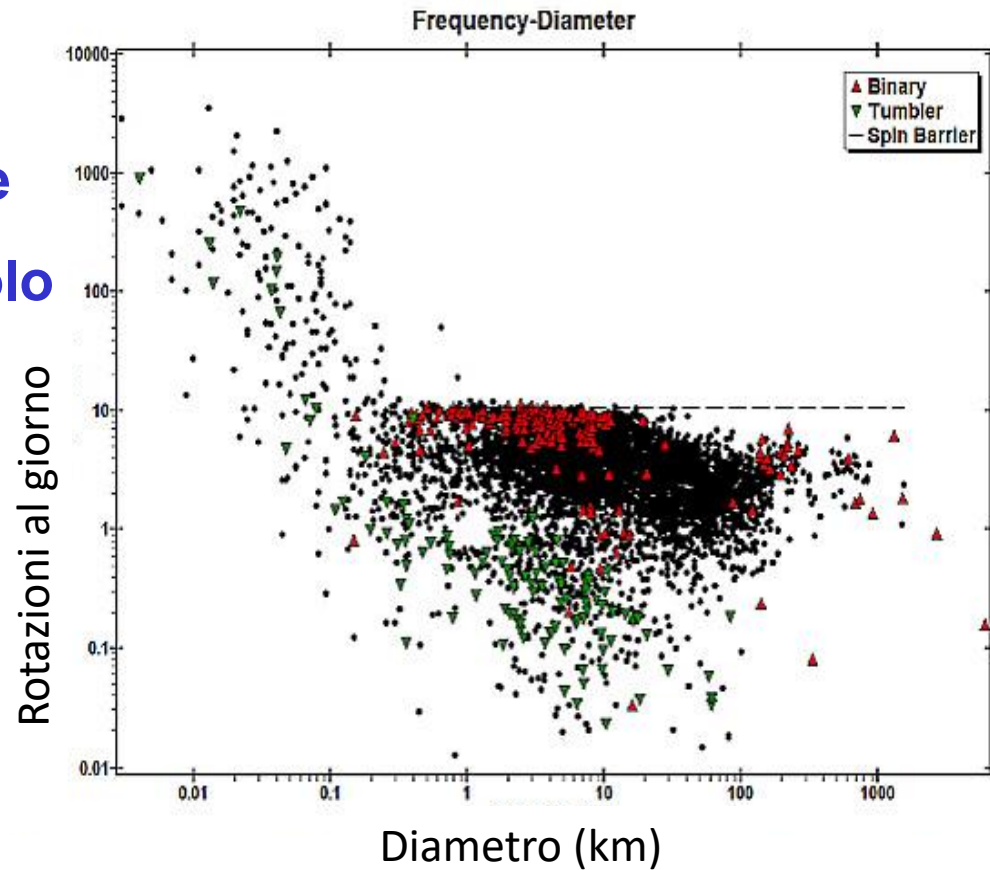


## Curve fase-magnitudine



# I dati fotometrici consentono di ricavare molte informazioni!

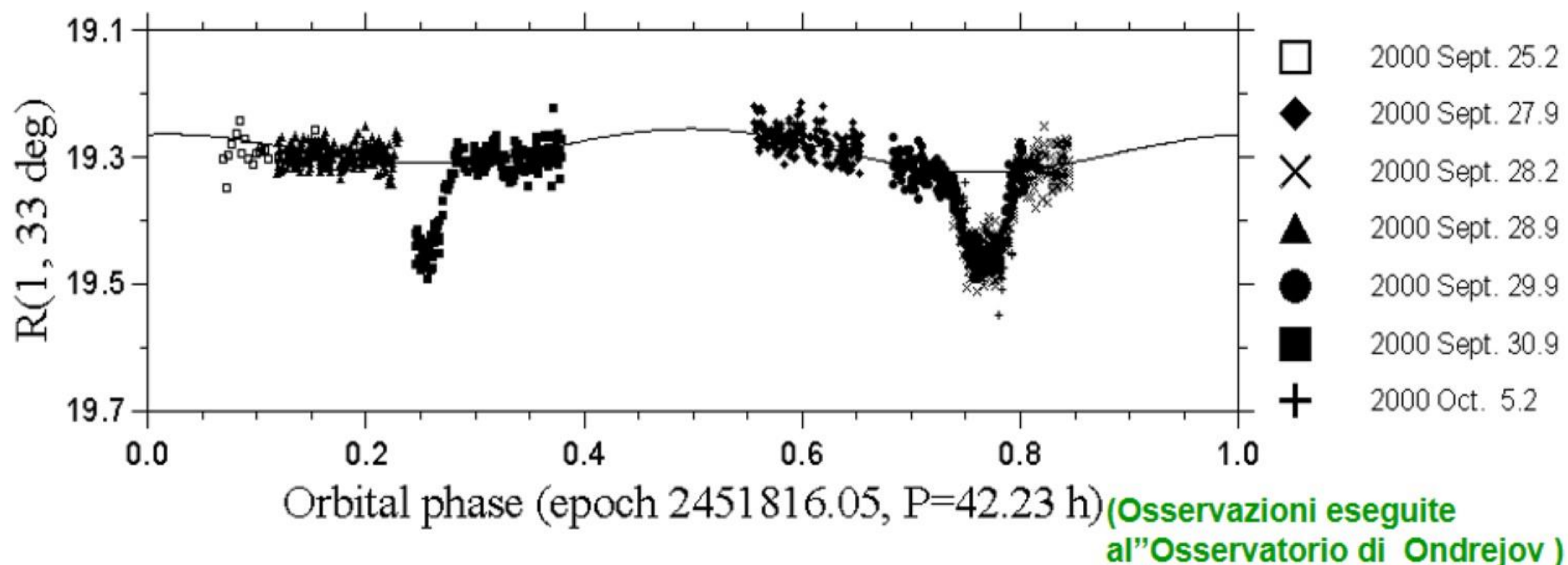
- periodi di rotazione
- orientazione del polo
- forme
- colori
- sistemi binari



Carbognani, Planetary Space Sci. 147, 1-5 (2017)

# Curva di luce dell'asteroide binario 2000 DP107

(Asteroide di tipo Apollo, binarietà scoperta con analisi di eco radar)



**Asteroidi binari "fotometrici" sono per lo più scoperti grazie ad evidenti fenomeni di eclissi mutue tra i due componenti.**



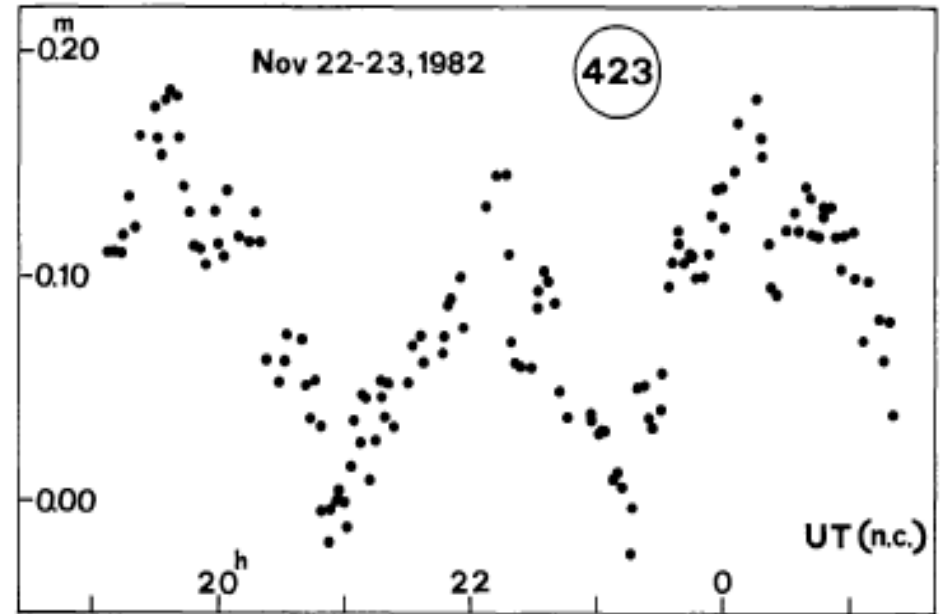
# Inizio anni 80

(423 Diotima, Di Martino and Cacciatori, 1984)

## Scoperta dei LASPA:

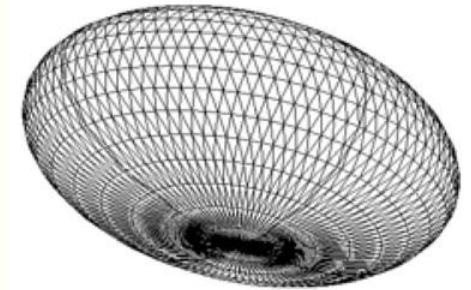
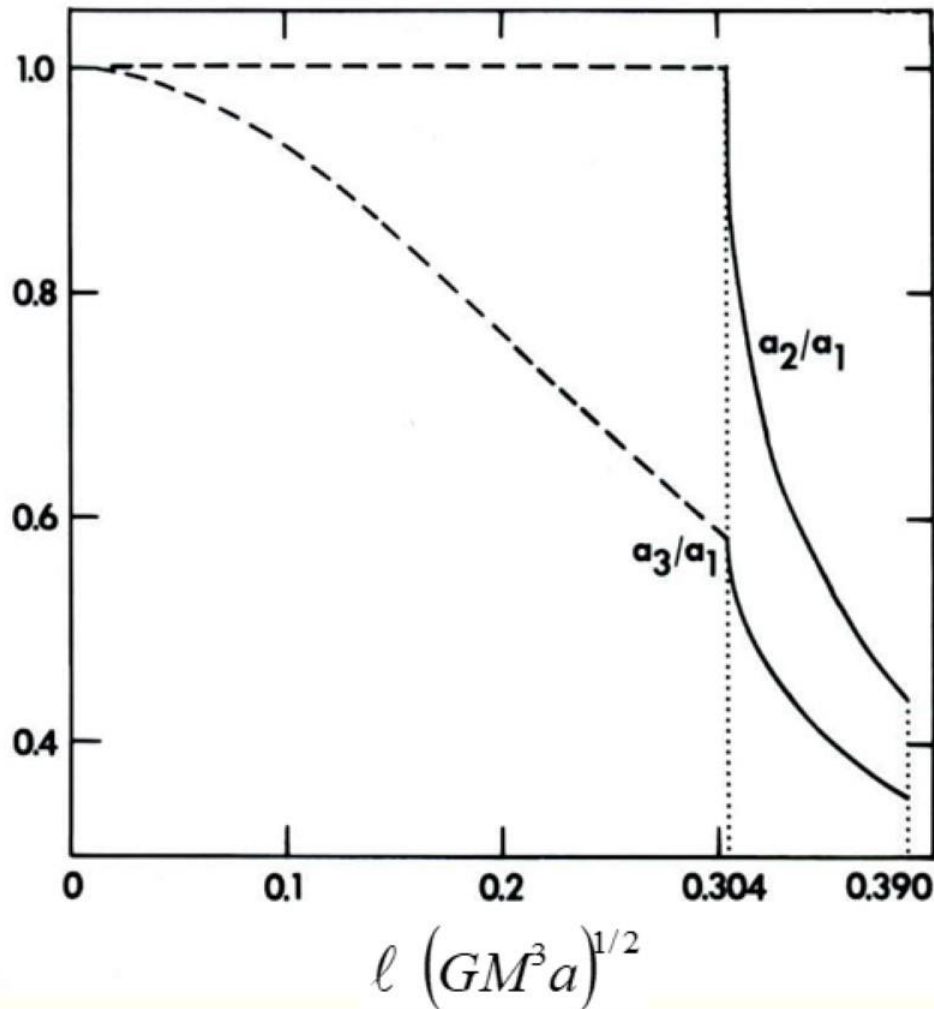
### Large-Amplitude Short-Period Asteroids

E la loro interpretazione da parte di Farinella et al. (Icarus, 46, 114-123, 1981)



**Abstract.** We present a physical model to explain the existence of a class of large-lightcurve-amplitude, rapidly rotating asteroids found most commonly among objects in the size range 100-300 km diameter. A significant correlation between rotation period and lightcurve amplitude exists for asteroids in this size range in the sense that those with larger amplitudes spin more rapidly and hence these objects have high rotational angular momenta. Since this is a property of Jacobi ellipsoids, we have investigated whether these asteroids might be examples of triaxial equilibrium ellipsoids. We find that objects rotating with periods of 6 hr must have densities between 1.1 and 1.4 g cm<sup>-3</sup>, while those rotating in 4 hr would have densities between 2.4 and 3.2 g cm<sup>-3</sup>. If this model is valid then at least some of these asteroids have rather low mean densities. The reality of this result and its interpretation in terms of collisional evolution of the asteroids is discussed.

# La sequenza di forme di equilibrio di Chandrasekhar



$a_2/a_1, a_3/a_1$ : axial ratios;

$l$ : adimensional angular momentum

$a$ : average radius

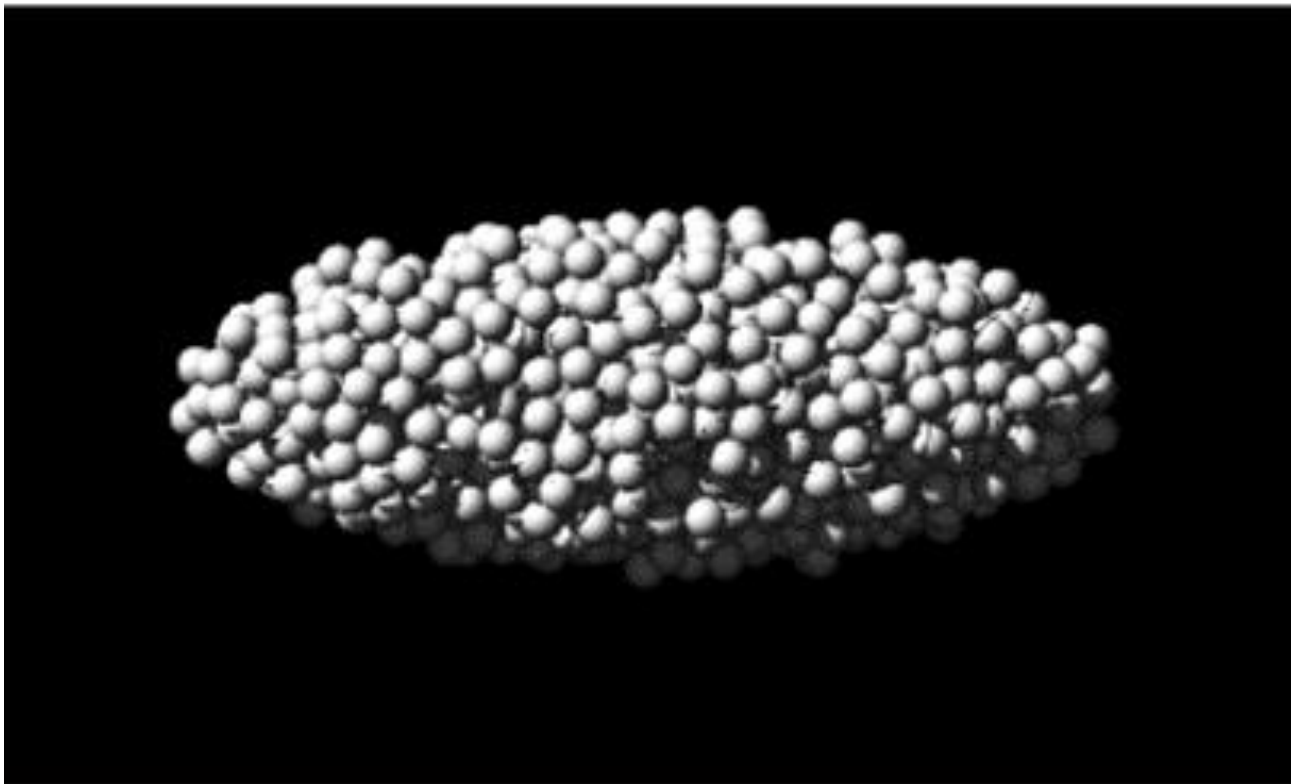
$M$ : mass

***Triaxial Equilibrium Shapes among the Asteroids ?***

Farinella et al. (1981)

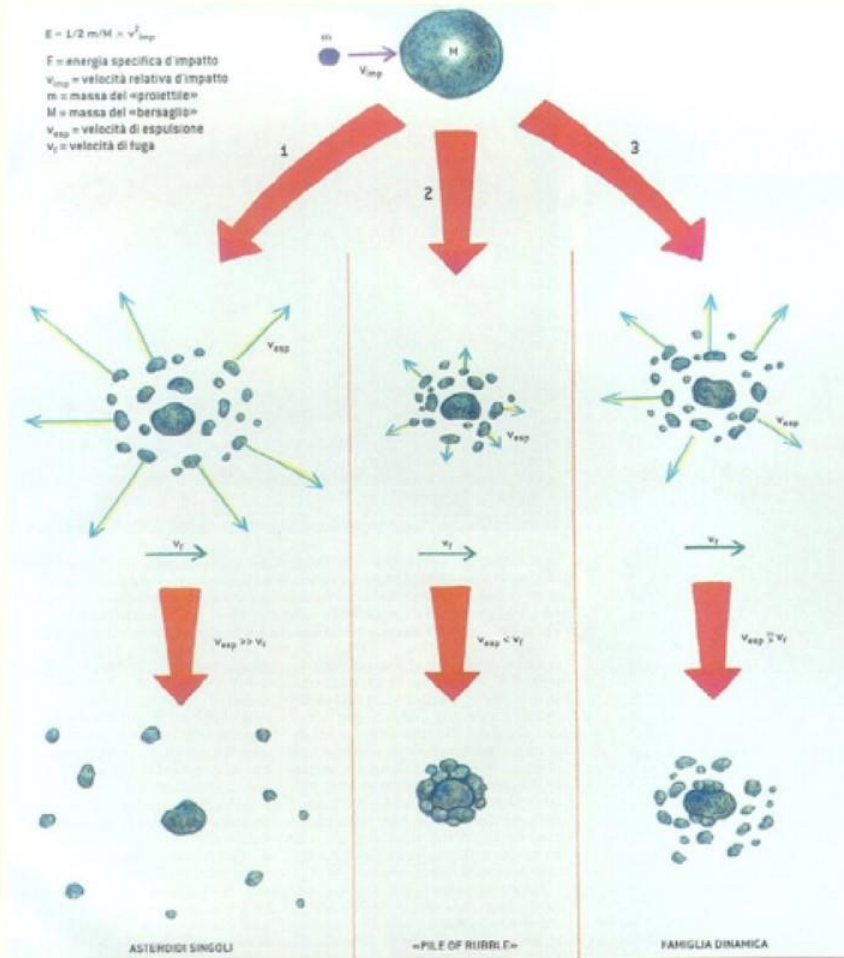
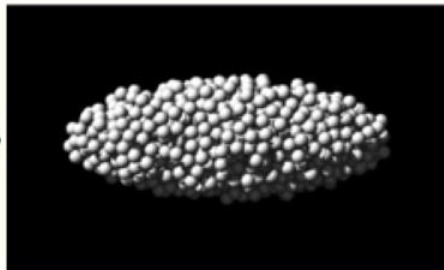
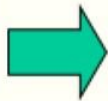
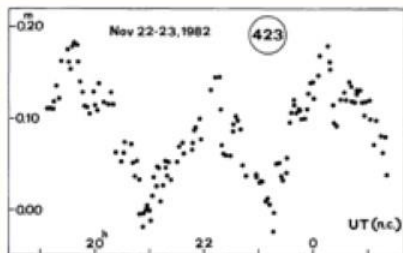
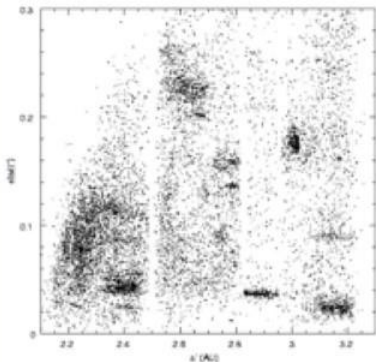
**E' difficile pensare che un corpo di composizione rocciosa come un asteroide possa comportarsi come un corpo fluido autogravitante!**

... **Ma... le cose possono cambiare se l'asteroide non ha una struttura monolitica come uno sarebbe portato a pensare, ma una struttura di tipo granulare!**



# Famiglie + LASPAs

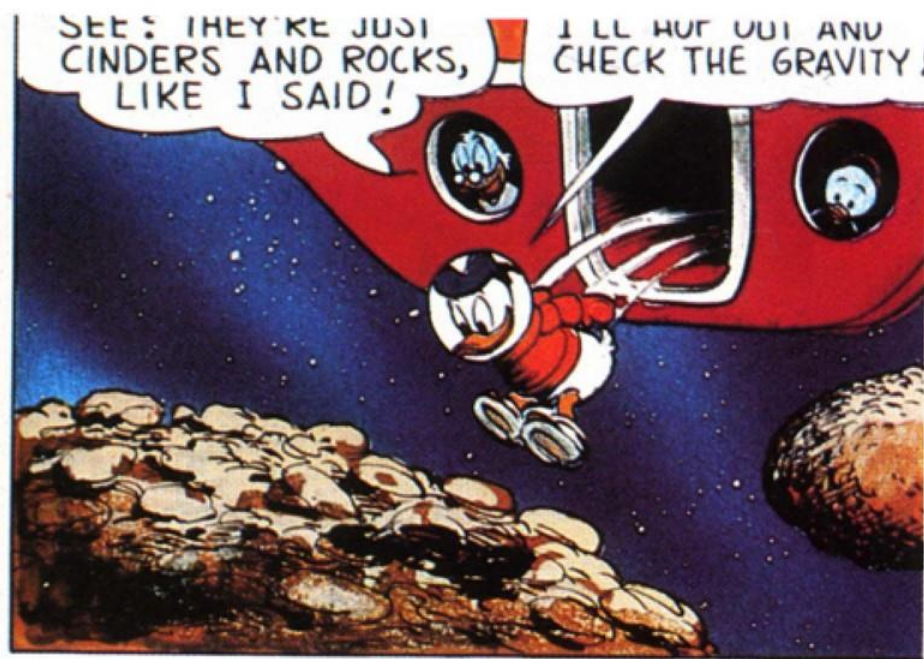
Evidenza che l'evoluzione collisionale è stata un meccanismo fondamentale per l'evoluzione della popolazione asteroidale



Gli Asteroidi come “*rubble piles*”

Esperimenti di laboratorio su impatti ad iper-velocità come mezzi per comprendere la popolazione degli asteroidi.







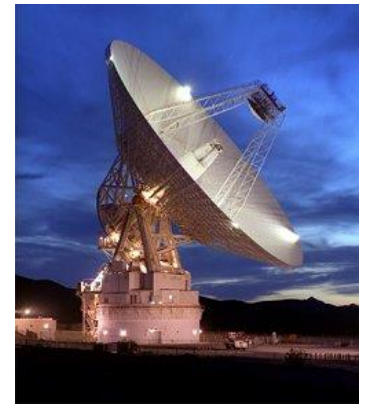
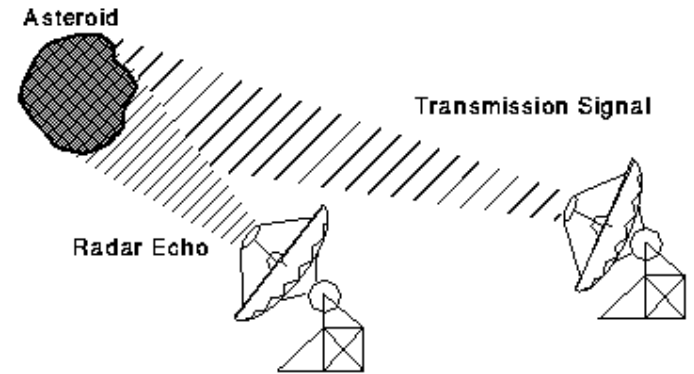
# Il complemento ideale dell'Astrometria: il RADAR

Permette di misurare le distanze e la velocità radiale



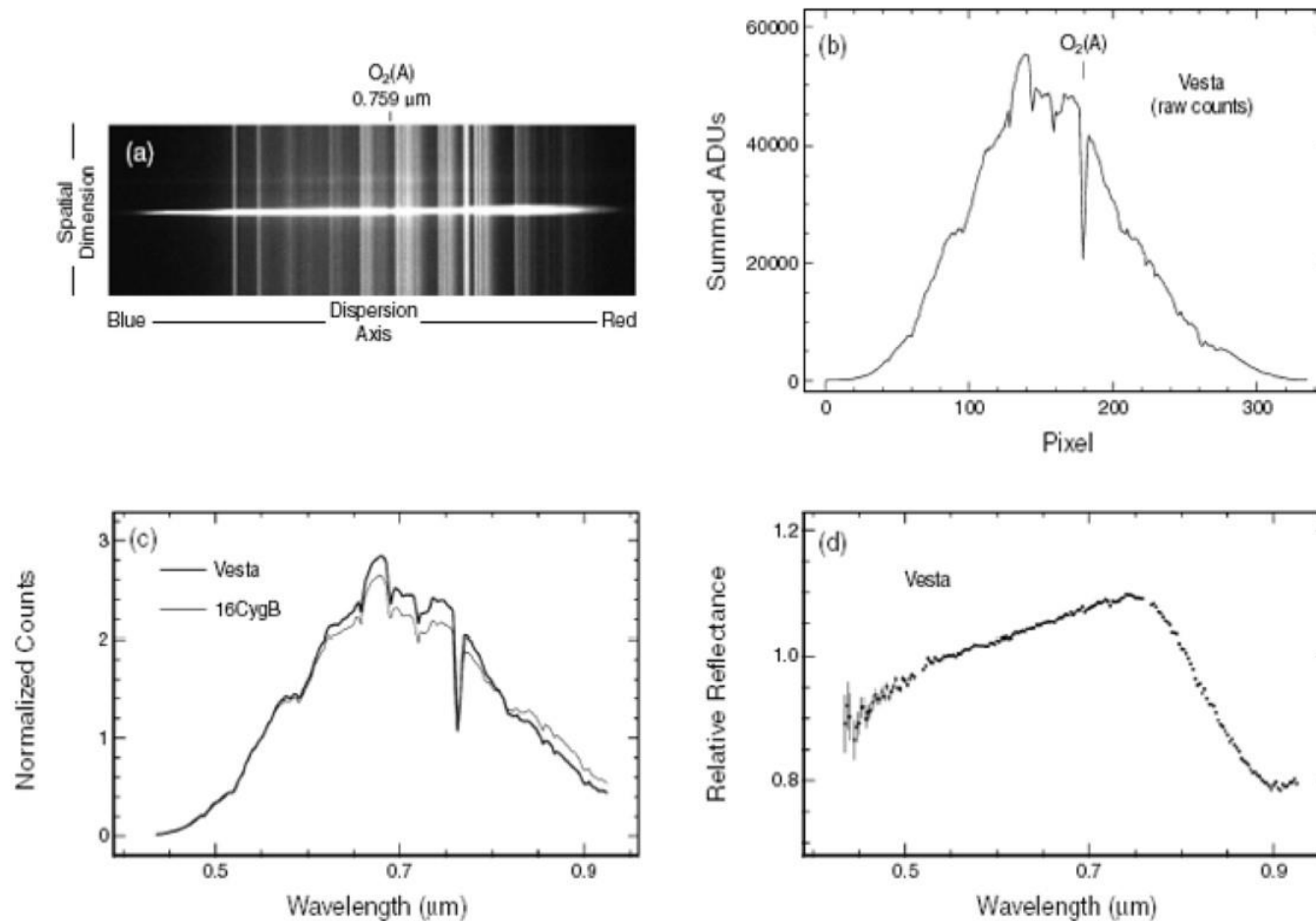
“Immagine” Radar di (4179) Toutatis

L'intensità dell'eco radar è proporzionale a  $R^{-4}$ , dove  $R$  è la distanza. **La tecnica è veramente efficace solo per gli oggetti più vicini**, come gli asteroidi “near-Earth”.





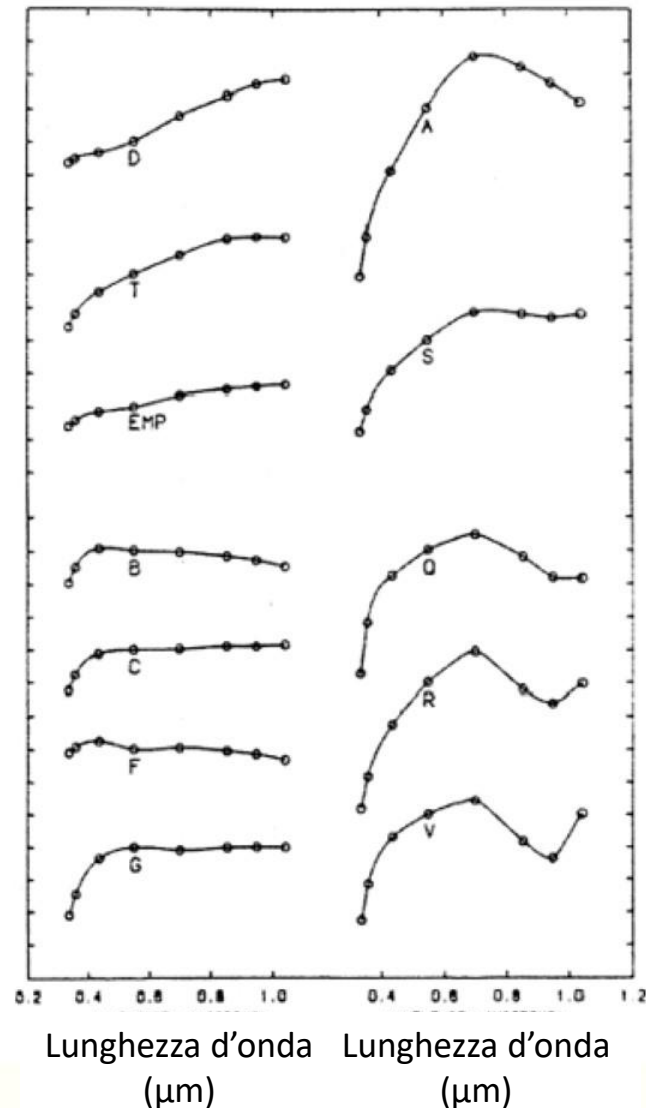
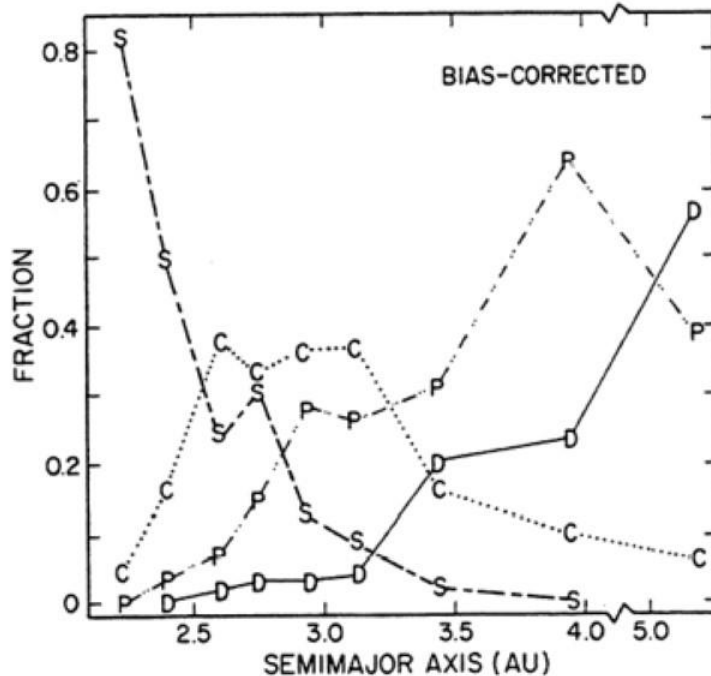
# Spettroscopia e Spettrofotometria



...Dallo spettro grezzo allo spettro di riflessione !

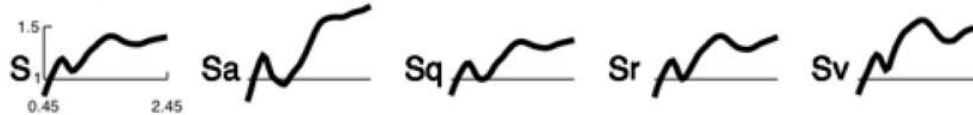
La classificazione tassonomica degli Asteroidi è tradizionalmente basata sulle proprietà spettrofotometriche o spettroscopiche.

La distribuzione di diverse classi tassonomiche in funzione della distanza eliocentrica è legata alla variazione generale della composizione con la distanza nel nostro Sistema Solare

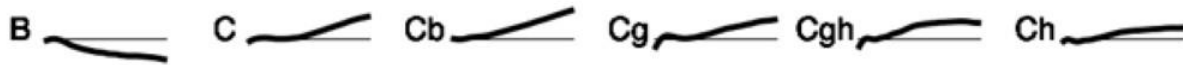


# Bus-DeMeo Taxonomy Key

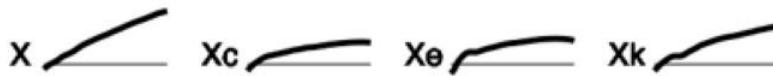
## S-complex



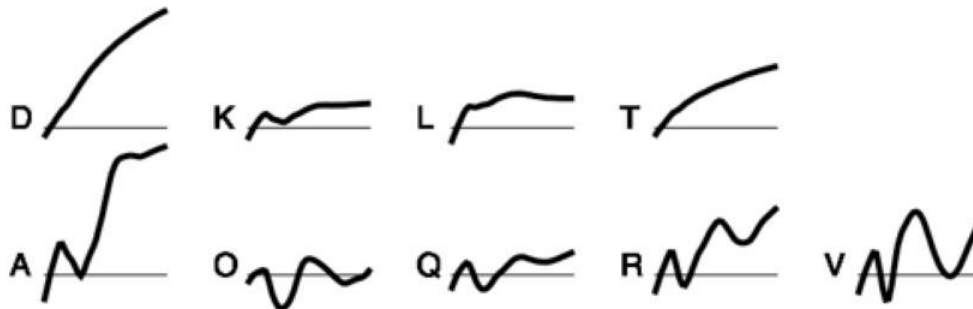
## C-complex



## X-complex



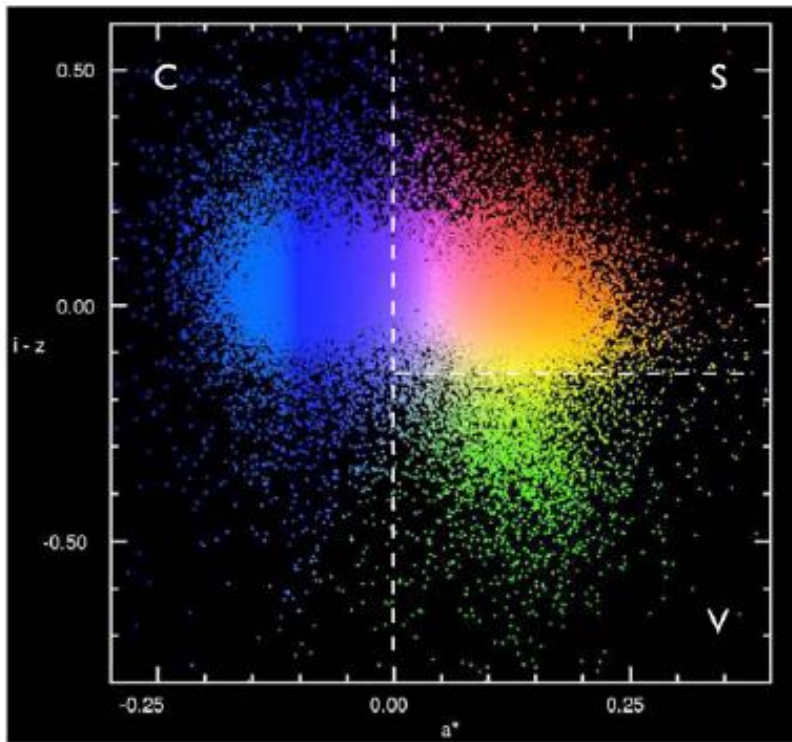
## End Members



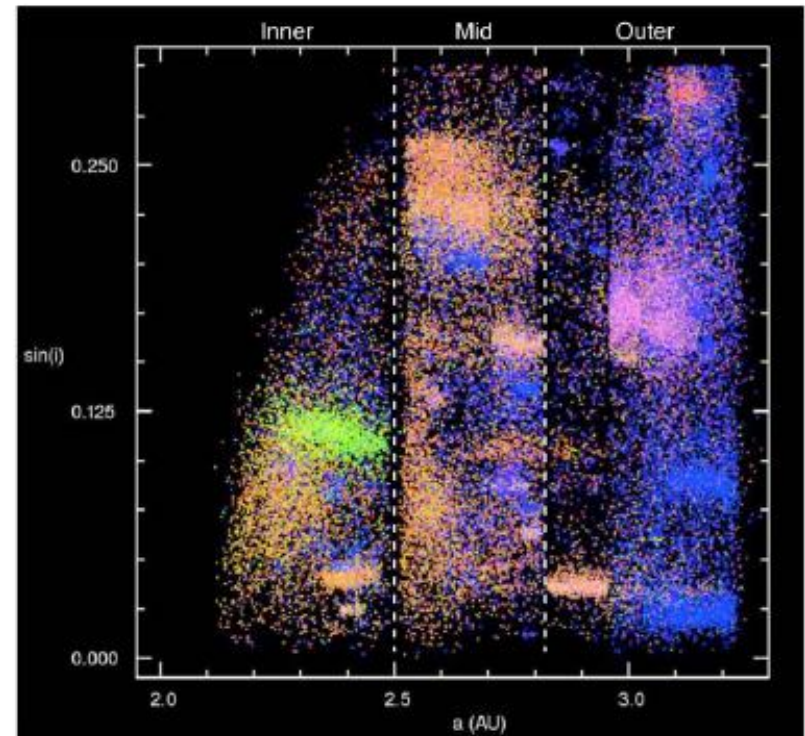
<http://smass.mit.edu/busdemeoclass.html>

F. E. DeMeo, R. P. Binzel, S. M. Slivan, and S. J. Bus. *Icarus* 202 (2009) 160-180

# Risultati di moderni studi di spettrofotometria (fotometria multi-banda): la *Sloan Digital Sky Survey*



**Fig. 3.** A plot of the color distribution in  $a^*$  and  $i-z$  of 45,087 unique objects listed in both the SDSS MOC 4 and ASTORB file, and that have  $H_{corr} < 16$ . The approximate boundaries of three spectral classes are marked, and used in labeling family type.



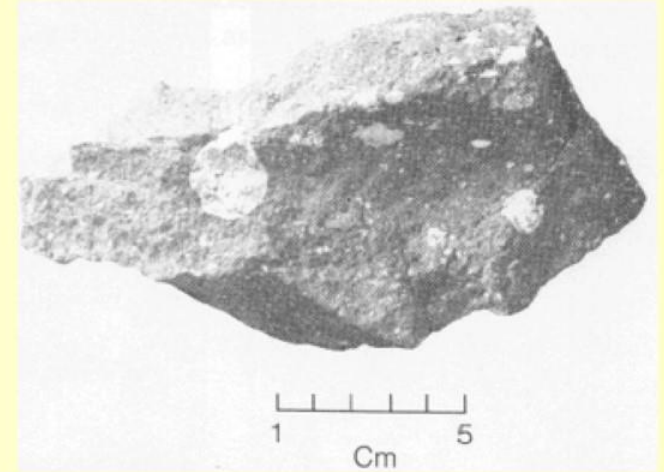
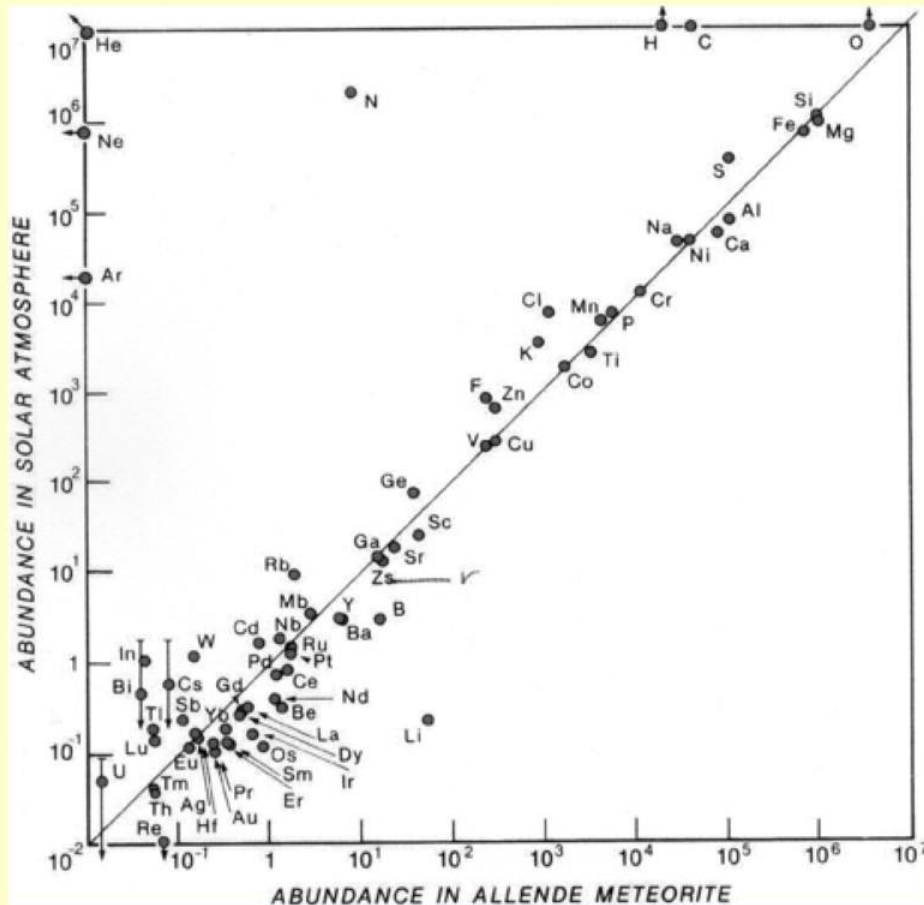
**Fig. 4.** A plot of the proper  $a$  vs.  $\sin(i)$  for the same objects as shown in Fig. 3. The color of each dot is representative of the object's color measured by SDSS, according to the color scheme defined in Fig. 3. The three main regions of the belt, defined by strong Kirkwood gaps, are marked.

# L'interpretazione mineralogica degli spettri di riflessione

Asteroid taxonomic classes and their general interpretation.

Type	Probable Surface Mineralogy	Albedo	Abundance	Bell's Superclass
<i>A</i>	Olivine or olivine-metal	High	Rare	Igneous
<i>B, F, G</i>	Hydrated silicates, carbon, organics	Low	Fairly rare	Metamorphic
<i>C</i>	"	Low	Common	Primitive
<i>D, P</i>	Carbon/organic-rich silicates	Very low	Common	Primitive
<i>E</i>	Enstatite, iron-free silicates	Very high	Rare	Igneous
<i>M</i>	Metal, metal + enstatite	Moderate	Moderately rare	Igneous
<i>Q</i>	Olivine + pyroxene + metal	Moderate	Rare	Primitive
<i>R</i>	Pyroxene + olivine	Moderate	Rare	Igneous
<i>S</i>	Metal, olivine, pyroxene	Moderate	Common	Igneous
<i>T</i>	Similar to <i>P</i> and <i>D</i> (?)	Moderate	Rare	Metamorphic
<i>V</i>	Pyroxene, feldspar	Moderate	Rare	Igneous

**Gli Asteroidi di classe C mostrano strette somiglianze con le classi di meteoriti più primitive che conosciamo, le Condriti Carbonacee.**



Con l'eccezione degli elementi più volatili (più volatili dell'azoto), le Condriti Carbonacee della sottoclasse CI sono campioni che rappresentano in modo eccellente la composizione originaria del Sistema Solare. Sono i campioni più antichi di materiale del Sistema Solare

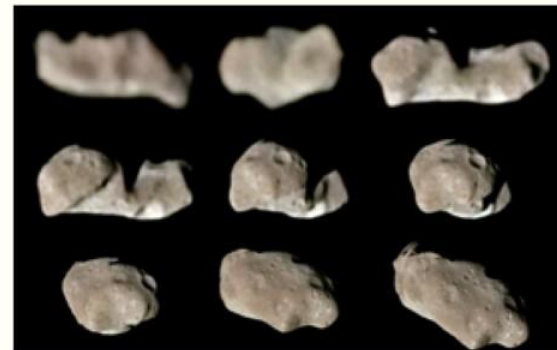
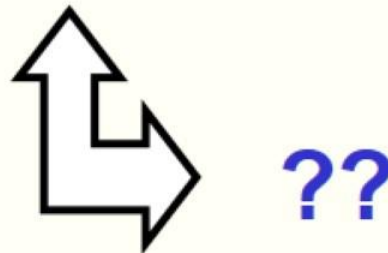
# Interpretazione delle classi tassonomiche in termini di un confronto con le meteoriti

(M -> Metalliche; C -> Carbonacee,...)

Generalmente  
OK, MA...



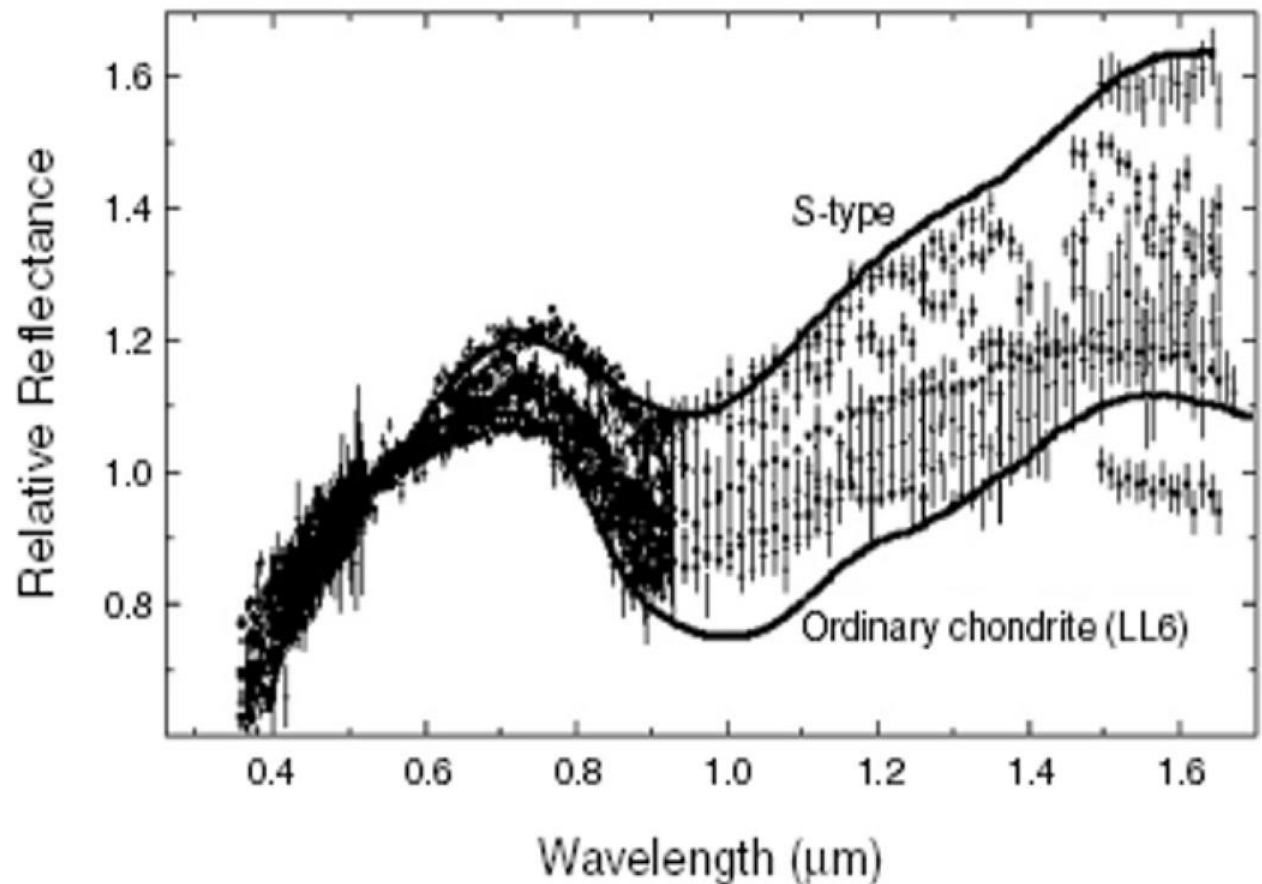
Il problema dell'origine delle Condriti Ordinarie dagli asteroidi della classe S: inconsistenze spettroscopiche.



# Spettri di tipo Condrite Ordinaria tra gli asteroidi Near-Earth

I NEA di classe S "fanno da cesura" tra gli spettri delle C.O. E quelli degli asteroidi S di fascia principale.

Questo è molto importante, dato che i NEA sono oggetti giovani, dato che le loro orbite non sono stabili



(Da Binzel *et al.*, 2001)




Risultati spettroscopici in accordo con l'esplorazione in situ di 243 Ida da parte della sonda spaziale Galileo.

*Space weathering al lavoro.*

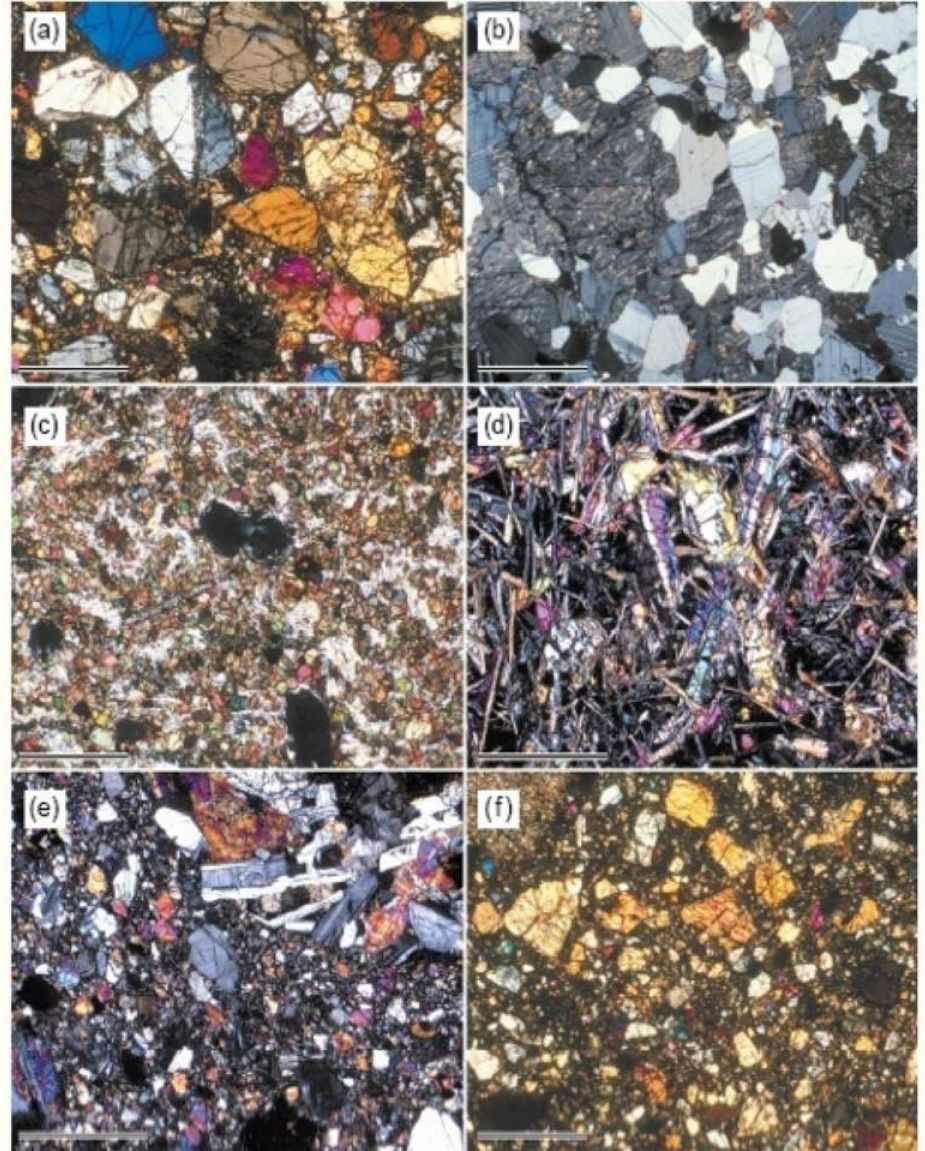
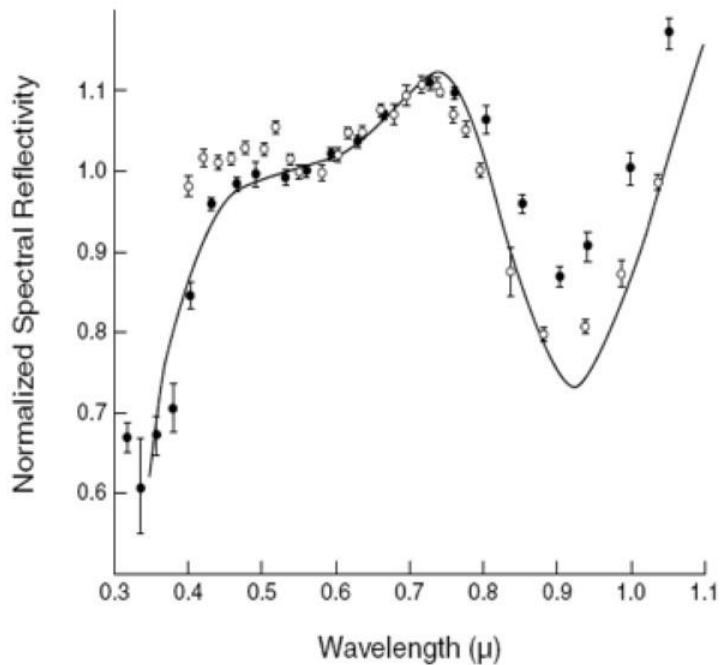


**Un altro problema: la banda di idratazione a 3- $\mu\text{m}$  osservata tra gli asteroidi di classe M, tradizionalmente ritenuti essere di composizione metallica**

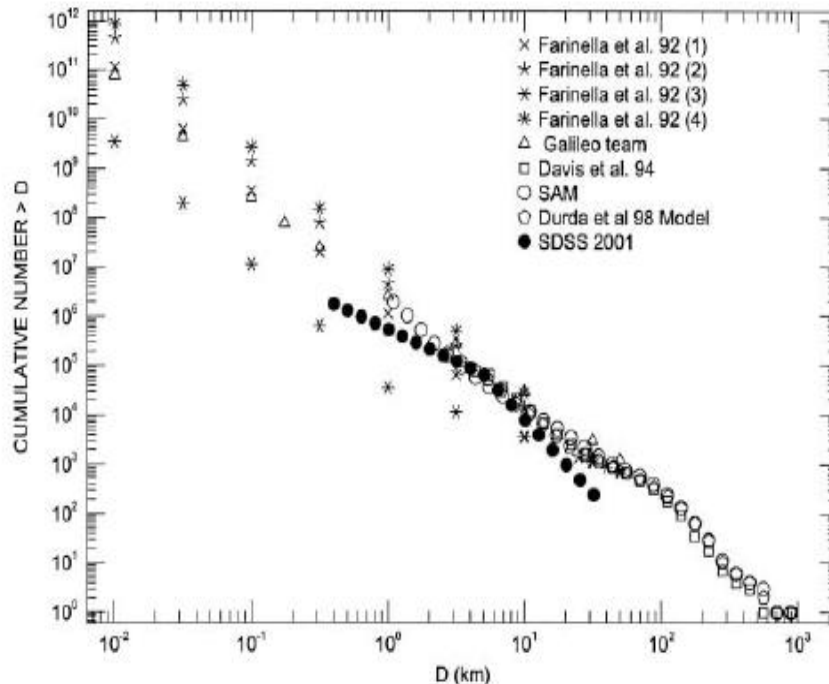
Tholen Class	3 $\mu\text{m}$			0.7 $\mu\text{m}$		
	Observed	With Band*	Percent	Observed	With Band	Percent
C	32	20	63	45	20	44
B	1	1	100	1	0	0
G	5	5	100	6	6	100
F	5	1	20	5	2	40
T	4	3	75	5	0	0
D/P	20	3	15	22	4	18
K/L	5	2	40	1	0	0
S	24	1	4	4	0	0
E	6	4	67	1	0	0
 M/W	27	10	37	23	1	4

\*Uncertainties vary, so the band depth limits are not uniform in these data.

**Le meteoriti di tipo HED:  
composizione basaltica.  
Pezzi di Vesta sono  
probabilmente nei nostri  
laboratori!**



# Inventario e distribuzione delle dimensioni degli asteroidi



Diversi modelli della distribuzione cumulativa dei diametri degli asteroidi.

Il ruolo dibattuto delle famiglie dinamiche (dominanti a piccole dimensioni?)

Secondo Bottke *et al.*, (2005) il numero di asteroidi più grandi di 1 km è dell'ordine di

$$N \geq 1 \text{ km} \sim 1.2 \cdot 10^6$$

Un problema fondamentale è sempre stato quello di convertire la magnitudine assoluta in diametro, senza conoscere l'albedo della maggior parte degli oggetti.

**La maggior parte degli asteroidi hanno luminosità apparenti molto deboli e sono intrinsecamente piccoli: le loro grandezze angolari apparenti sono normalmente ben al di sotto del potere risolutivo anche dei telescopi più grandi da Terra e dallo spazio.**

**Come si fa allora a stimare le dimensioni e le masse di oggetti così minuscoli per mezzo delle nostre tecniche di osservazione remota?**

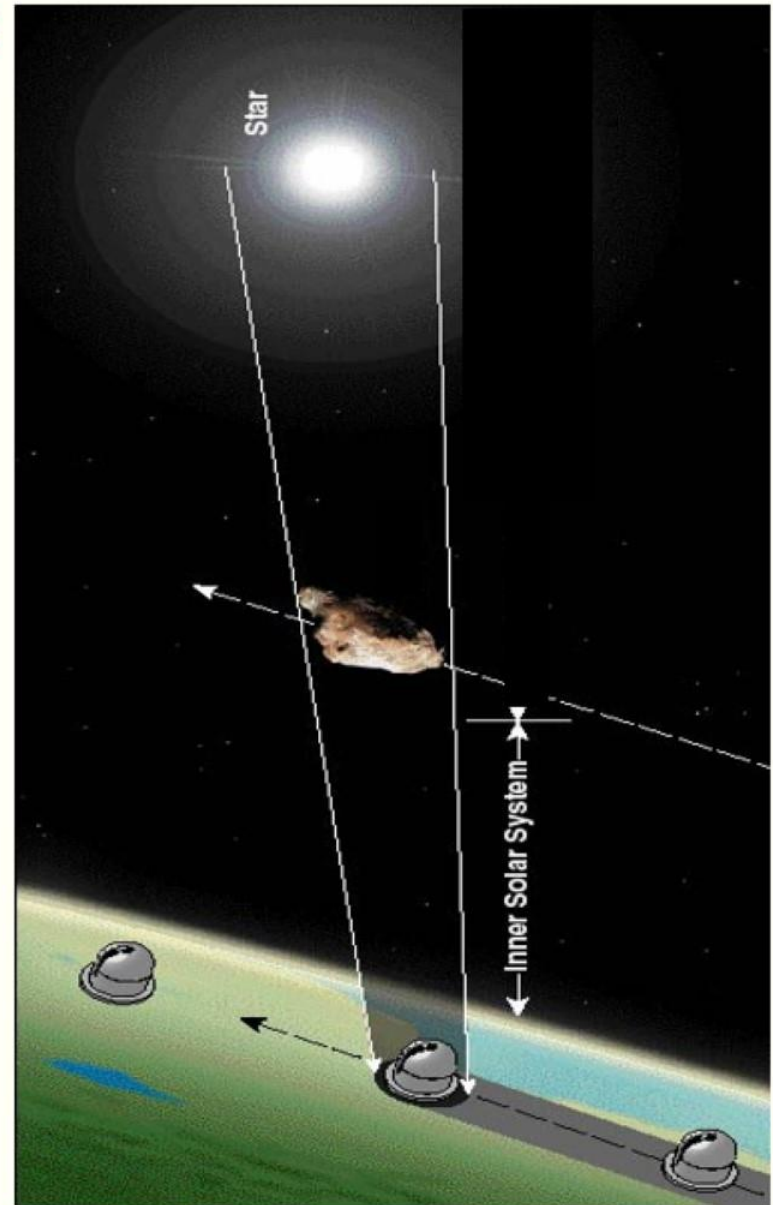
## Osservazioni di Occultazioni:

Eccellente in linea di principio,  
***ma molto difficile***, in pratica,  
***fino al recente passato.***

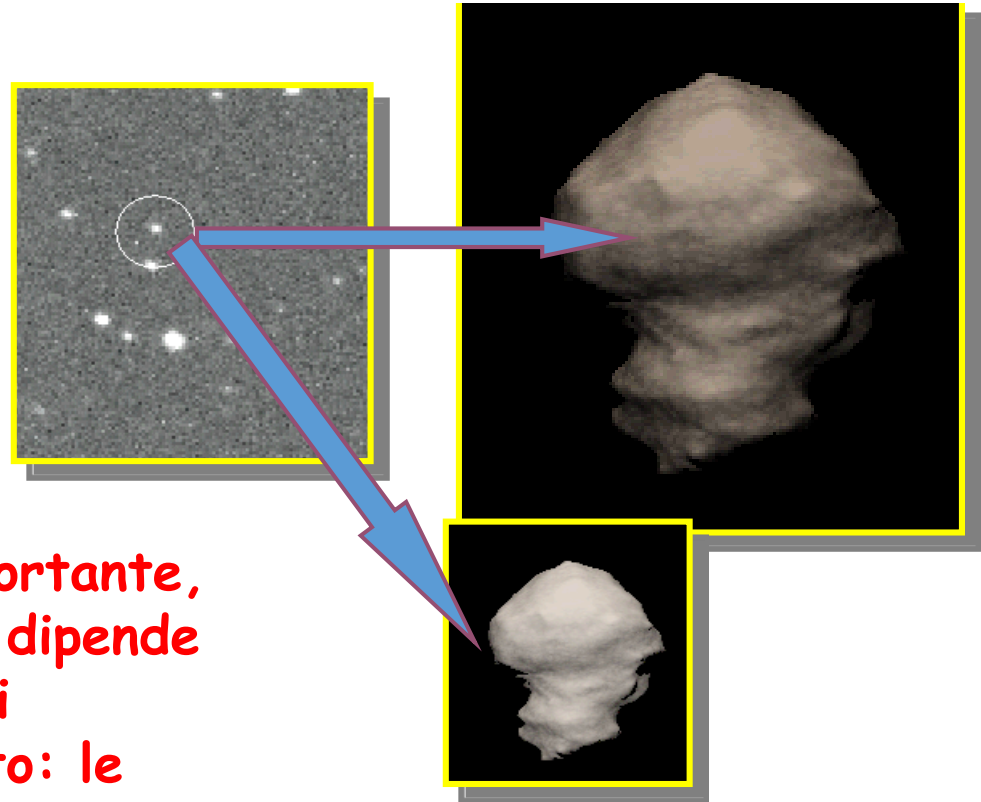
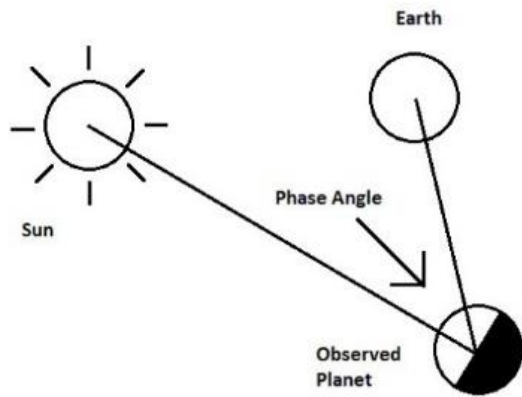
Problemi di conoscenza  
insufficiente delle orbite degli  
asteroidi e delle posizioni precise  
delle stelle.

“Strisce” di visibilità degli eventi  
molto limitate (e problemi di  
tempo atmosferico)

***Ma GAIA sta cambiando  
completamente lo scenario!***



La luminosità apparente di un asteroide dipende da molte cose. Per prima cosa, dipende dalla sua distanza dal Sole (che lo illumina) e dall'osservatore. In modo più complicate, dipende dalle condizioni di illuminamento all'epoca in cui si osserva ("angolo di fase")



In modo ancora più importante, la luminosità apparente dipende da due parametric fisici fondamentali dell'oggetto: le sue dimensioni (diametro) e la sua *albedo*

Si noti che, tra gli asteroidi, l'albedo varia di un fattore 10.

$$\log(D) = 3.1236 - 0.2H - 0.5 \log(p_V)$$

Nella formula qui sopra:

La costante **3.1236** vale per osservazioni eseguite nel colore V (dipendenza dalla lunghezza d'onda).

**$p_V$**  è l'**albedo geometrica in luce V**. È definita come il rapporto tra la luminosità osservata ad angolo di fase zero (opposizione ideale) e la luminosità di un disco idealizzato delle stesse dimensioni, e che diffonda la luce incidente in modo ideale (Lambertiano in termini tecnici).

**$H$**  è la **magnitudine assoluta**, cioè la magnitudine in luce V misurata all'unità di distanza sia dal sole che dall'osservatore, **ad angolo di fase zero**.

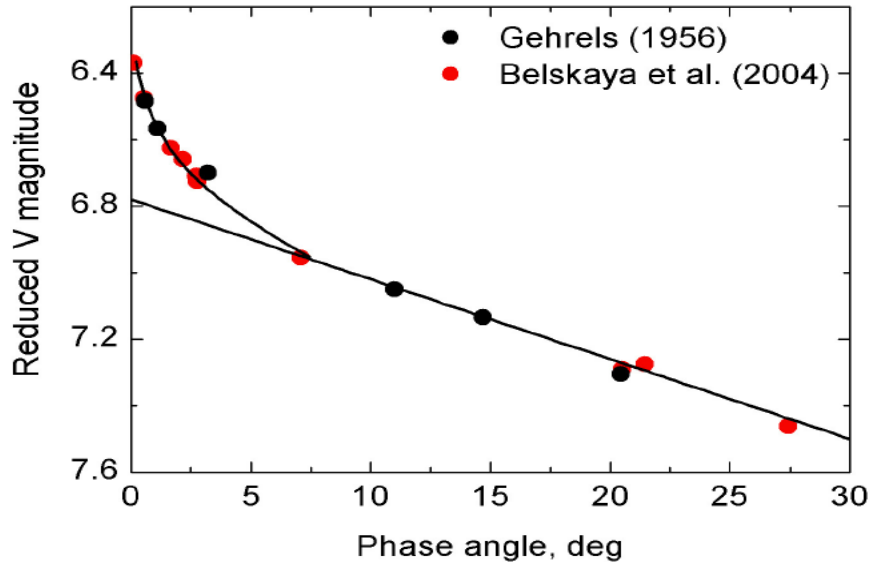
**$D$**  è il **diametro in km**, dell'oggetto (assumendo che sia sferico).

**Conoscendo due dei tre parametri fisici incogniti, si ricava il terzo!**



# PROBLEMI: IL COSIDDETTO EFFETTO DI OPPOSIZIONE IN FOTOMETRIA

Forte aumento di luminosità misurato ad angoli di fase piccoli (vicini all'opposizione).



(Cortesia di I.N. Belskaya)

$H$  è la magnitudine assoluta, cioè la luminosità apparente che sarebbe misurata se l'oggetto si trovasse a distanza unitaria dal Sole e dall'osservatore e ad angolo di fase nullo..

## Asteroid 20 Massalia (S-type)

Albedo: 0.21, diametro: 145 km

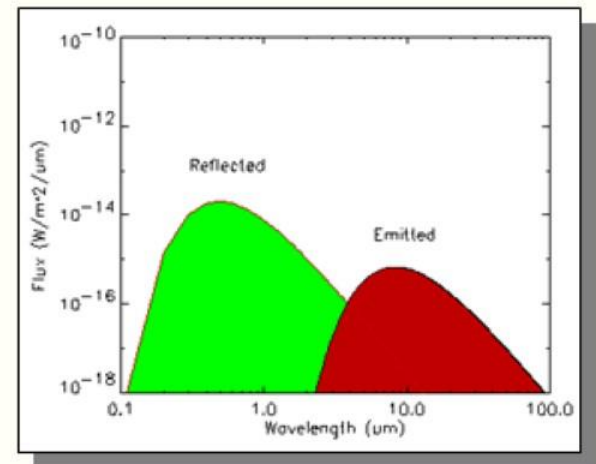
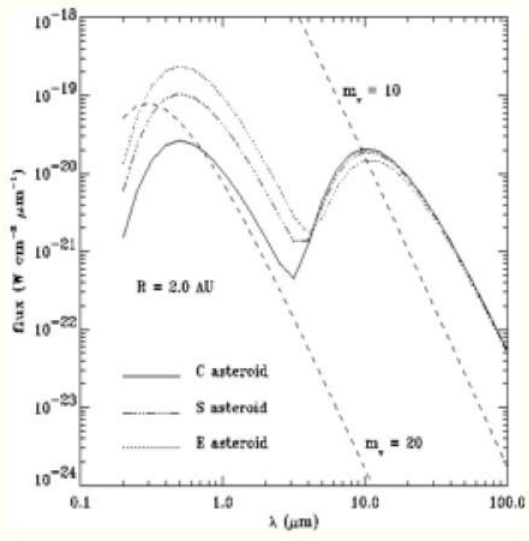
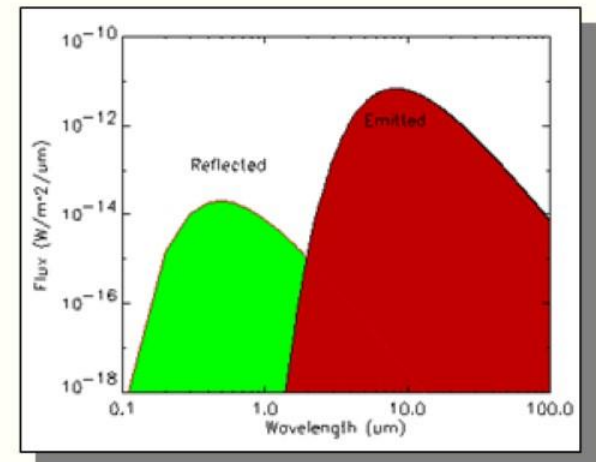
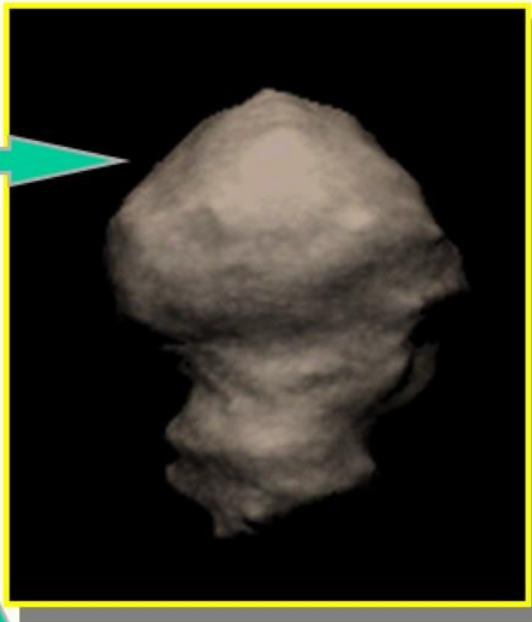
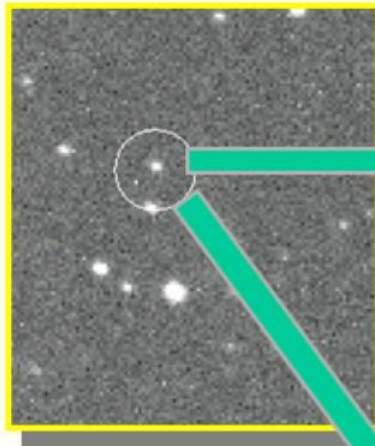
Ampiezza dell'EO: 0.4 mag

Inizio dell'EO: ~7 deg

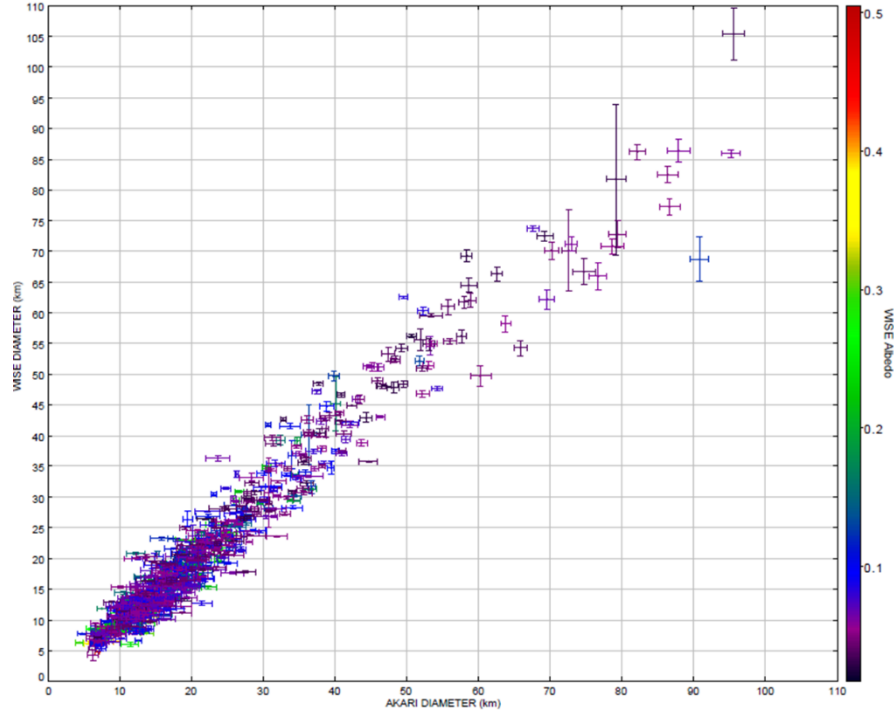
Pendenza della parte lineare  $\beta$ :  
0.03 mag/°

**A causa della sua definizione, il valore della magnitudine assoluta  $H$  dipende fortemente dall'aumento non lineare di luminosità legato all'effetto di opposizione. Purtroppo quest'ultimo è un effetto che può difficilmente essere previsto a priori.**

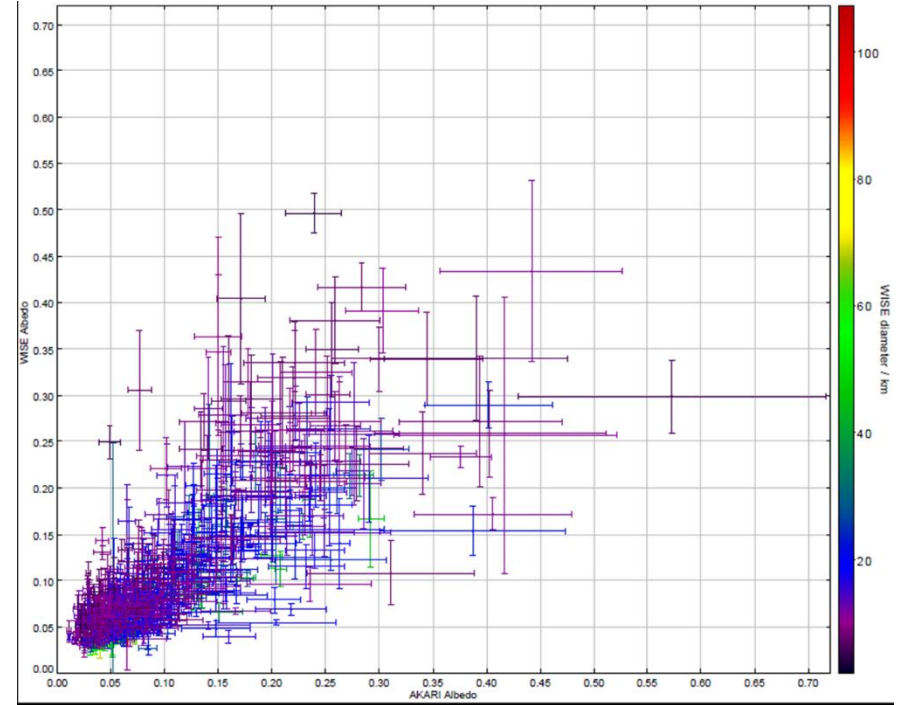
# Radiometria Termica



## Akari - Wise: Diametri



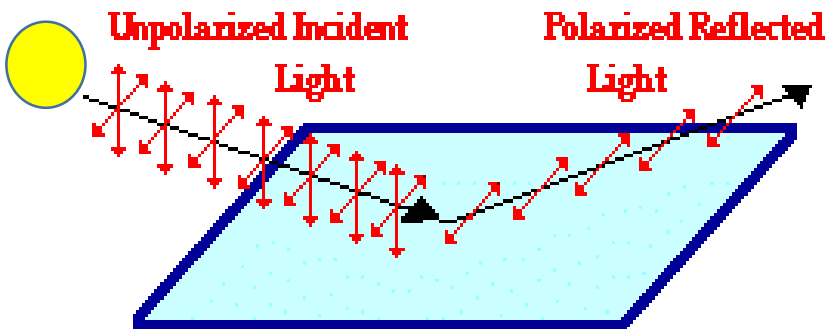
## Akari - Wise: albedo



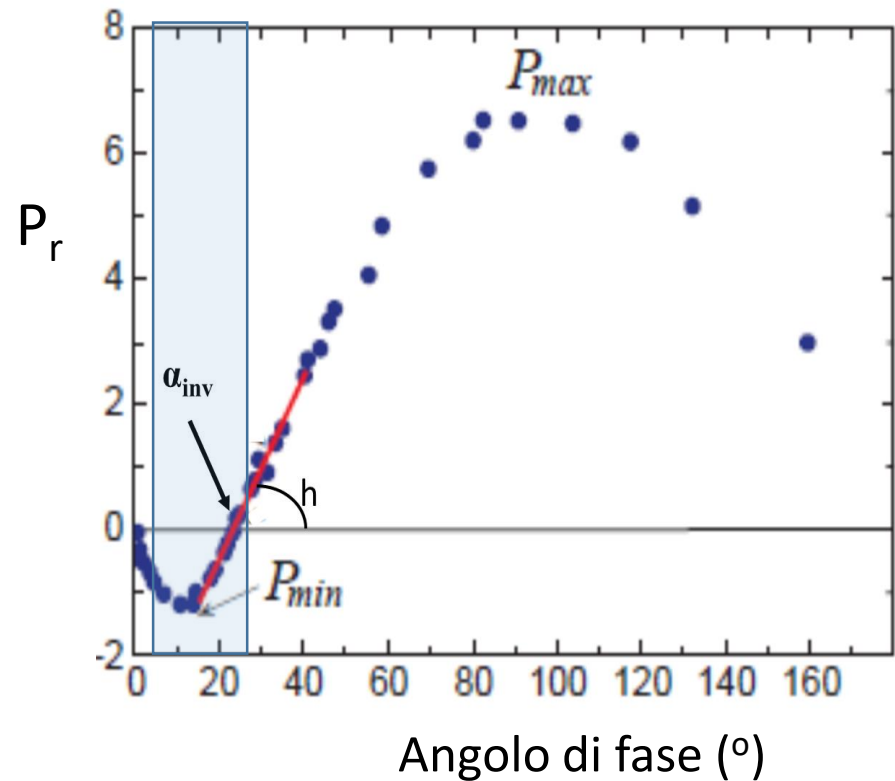
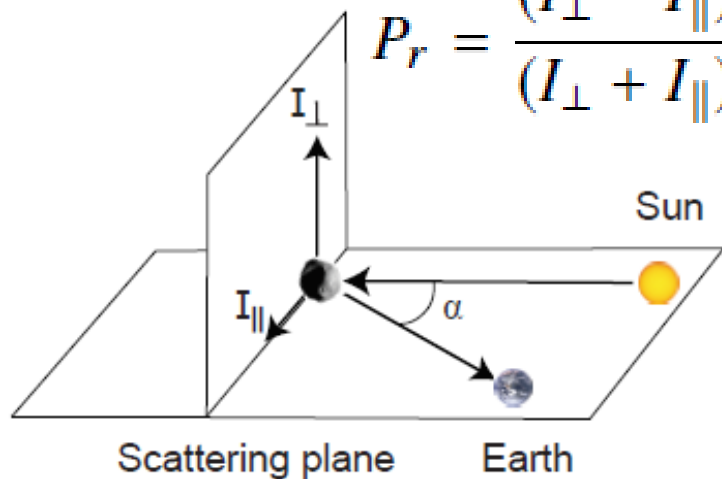
**Le misure delle magnitudini visuali V non sono mai eseguite contemporaneamente alle misure nell'IR termico.** Le misure delle dimensioni non ne risentono molto, ma **per calcolare le albedo bisogna conoscere il valore da assegnare alla magnitudine assoluta H**, per poter stimare il flusso nel visibile all'epoca delle misure infrarosse. **E le magnitudini assolute sono conosciute male.** **Le albedo stimate dalla Radiometria termica sono molto incerte.**  
*E' possibile fare di meglio?*

# Proprietà generali dello stato di polarizzazione della luce che riceviamo dagli asteroidi

Riflessione e diffusione producono polarizzazione lineare



$$P_r = \frac{(I_{\perp} - I_{\parallel})}{(I_{\perp} + I_{\parallel})}$$



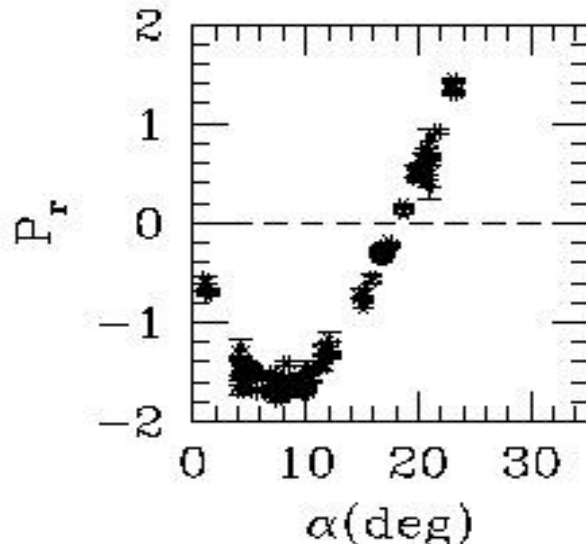
Alcuni parametri classici delle curve fase - polarizzazione:

- $P_{min}$
- Angolo di inversione  $\alpha_{inv}$
- Pendenza polarimetrica  $h$

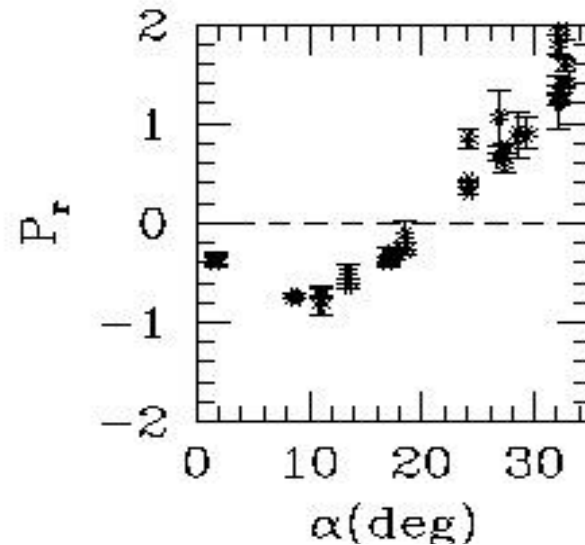
# Perchè le misure polarimetriche degli asteroidi sono importanti?

- Per determinare l'albedo
- Per ricavare informazioni su altre caratteristiche della superficie
- Per determinare la classificazione tassonomica
- Per identificare oggetti, o classi di oggetti, che hanno proprietà peculiari
- Per identificare possibili comete estinte
- Per gli scopi di una determinazione rapida di proprietà fisiche degli oggetti che si possono avvicinare alla Terra.
- Perché le proprietà polarimetriche sono utili per comprendere meglio la fisica dei processi di diffusione della luce da parte di superfici planetarie.

(1) Ceres: classe G



(7) Iris: classe S



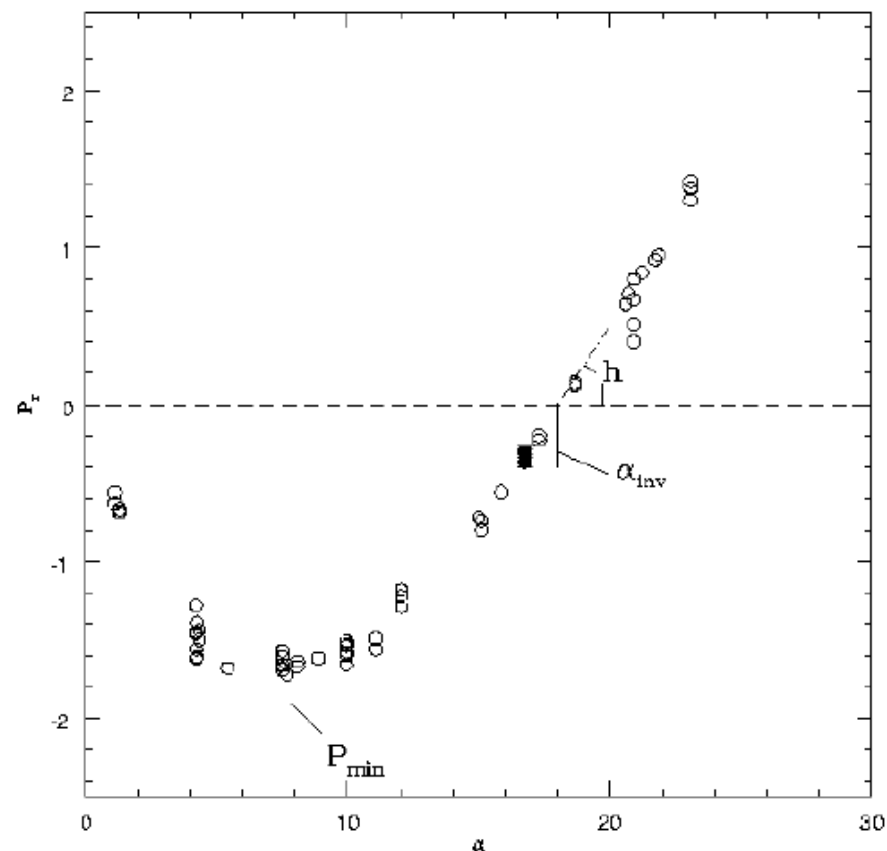
La morfologia delle curve fase - polarizzazione è generalmente simile per tutti gli oggetti, ma esistono differenze nei dettagli che sono importanti, perchè dipendono dalle proprietà della superficie, in particolare dall'albedo, e quindi dalla composizione.

# Come ricavare l'albedo dalle proprietà delle curve fase - polarizzazione

$$\log p_V = C_1 \log (h) + C_2$$

$$\log p_V = C_3 \log (P_{\min}) + C_4$$

... più altre relazioni simili con altri parametri polarimetrici



$$\log(p_V) = C_1 \log(h) + C_2$$

$$\log(p_V) = C_1 \log(h) + C_2 \quad (p_V \geq 0.08)$$

$$\log(p_V) = C_1 \log(h_{ABC}) + C_2$$

$$\log(p_V) = C_1 \log(h_{ABC}) + C_2 \quad (p_V \geq 0.08)$$

$$\log(p_V) = C_3 \log(P_{\min}) + C_4$$

$$\log(p_V) = C_3 \log(P_{\min}) + C_4 \quad (p_V \geq 0.08)$$

$$\log(p_V) = C_{\psi 1} \log(\Psi) + C_{\psi 2}$$

$$\log(p_V) = C_{*1} p^* + C_{*2}$$

$$\log(h) = H_1 (\log(p_V))^2 + H_2 \log(p_V) + H_3$$

$$C_1 = -1.111 \pm 0.031$$

$$C_1 = -0.800 \pm 0.041$$

$$C_1 = -1.139 \pm 0.026$$

$$C_1 = -0.780 \pm 0.037$$

$$C_3 = -1.419 \pm 0.034$$

$$C_3 = -0.869 \pm 0.042$$

$$C_{\psi 1} = -0.987 \pm 0.022$$

$$C_{*1} = -0.896 \pm 0.029$$

$$H_1 = -1.294 \pm 0.001$$

$$C_2 = -1.781 \pm 0.025$$

$$C_2 = -1.467 \pm 0.037$$

$$C_2 = -1.850 \pm 0.021$$

$$C_2 = -1.469 \pm 0.036$$

$$C_4 = -0.918 \pm 0.006$$

$$C_4 = -0.789 \pm 0.008$$

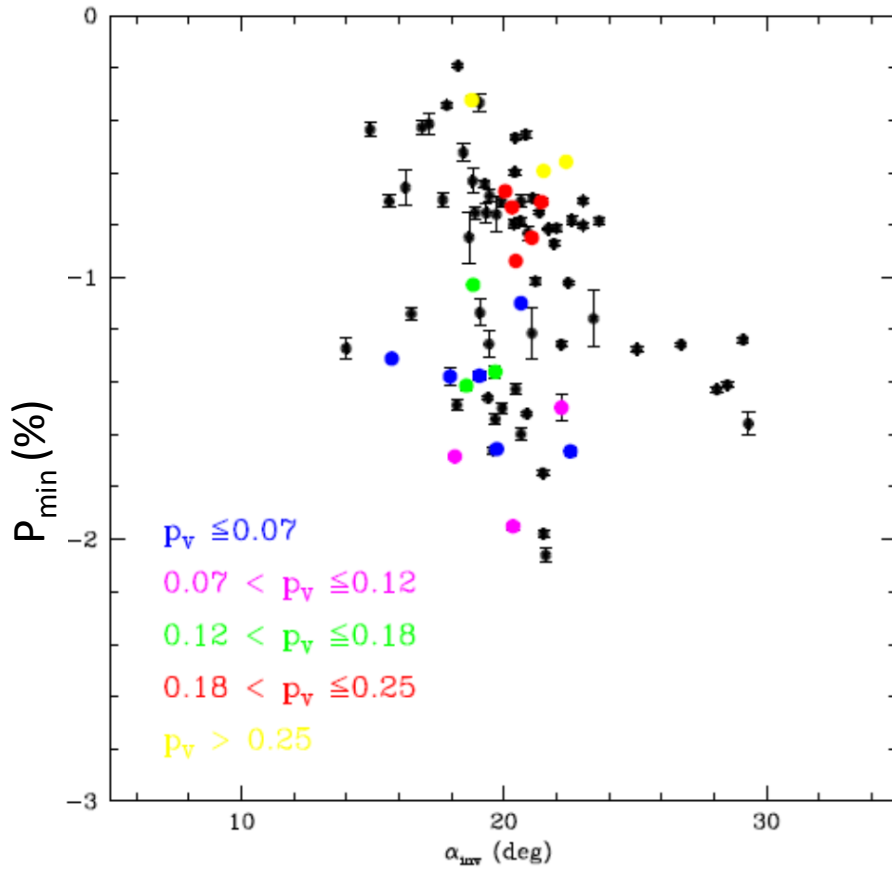
$$C_{\psi 2} = -0.458 \pm 0.013$$

$$C_{*2} = -1.457 \pm 0.018$$

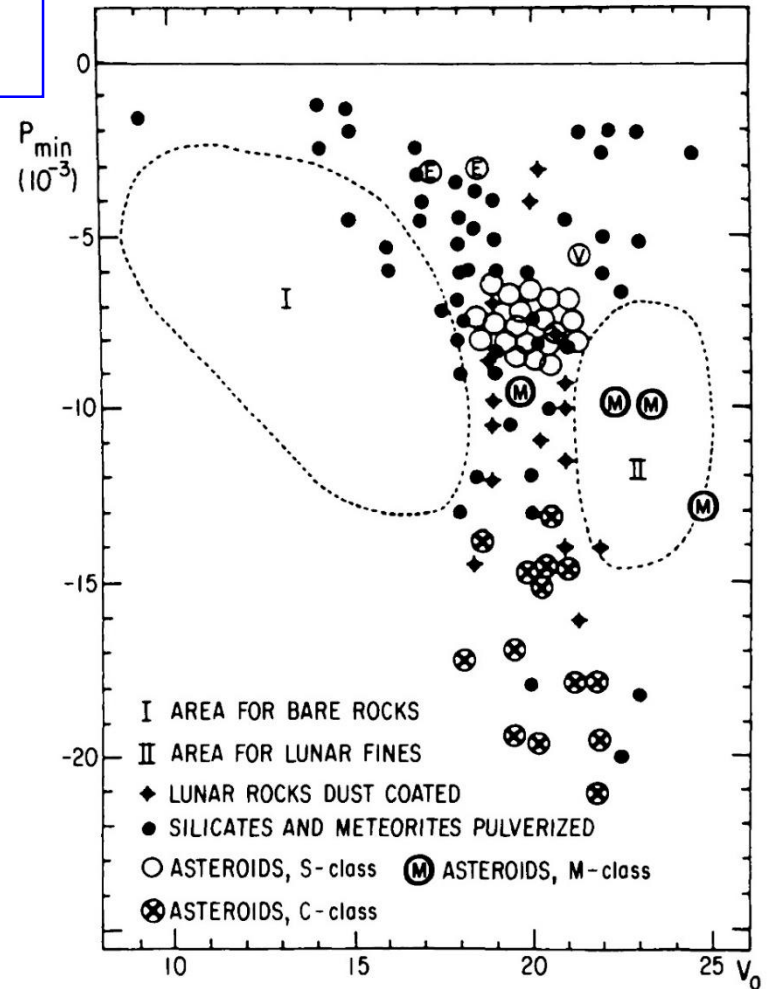
$$H_2 = -3.140 \pm 0.001$$

$$H_3 = -2.428 \pm 0.001$$

# Altri risultati "classici"

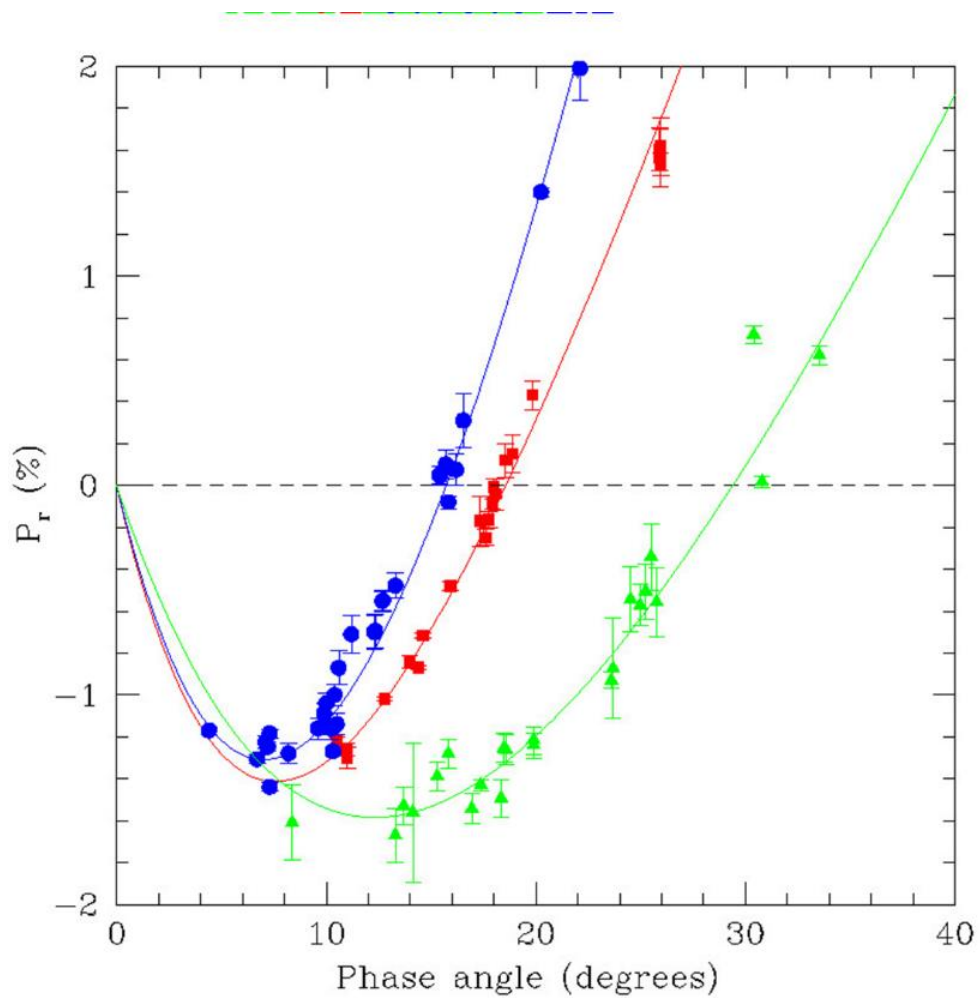


Angolo di inversione  $\alpha_{inv}$



(Dollfus et al., 1989)



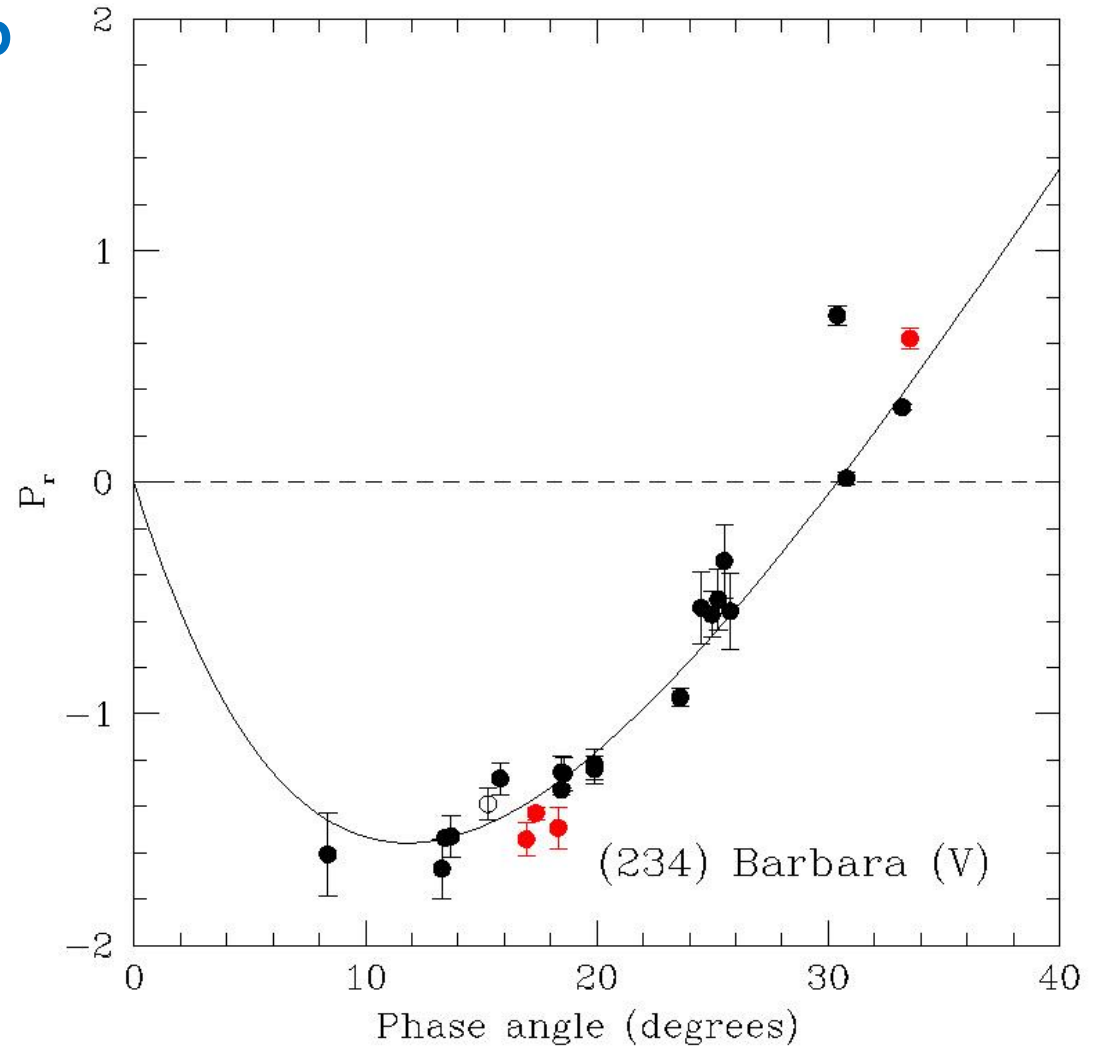


**Il ruolo della polarimetria nell'identificazione di diverse classi tassonomiche, al di là della determinazione dell'albedo.**

**Il caso di (234)  
Barbara, il prototipo  
di una nuova classe  
di oggetti.**

**Polarizzazione  
fortemente negativa ad  
angoli di fase intorno a  
20°**

**Valore molto alto  
dell'angolo di inversione!**

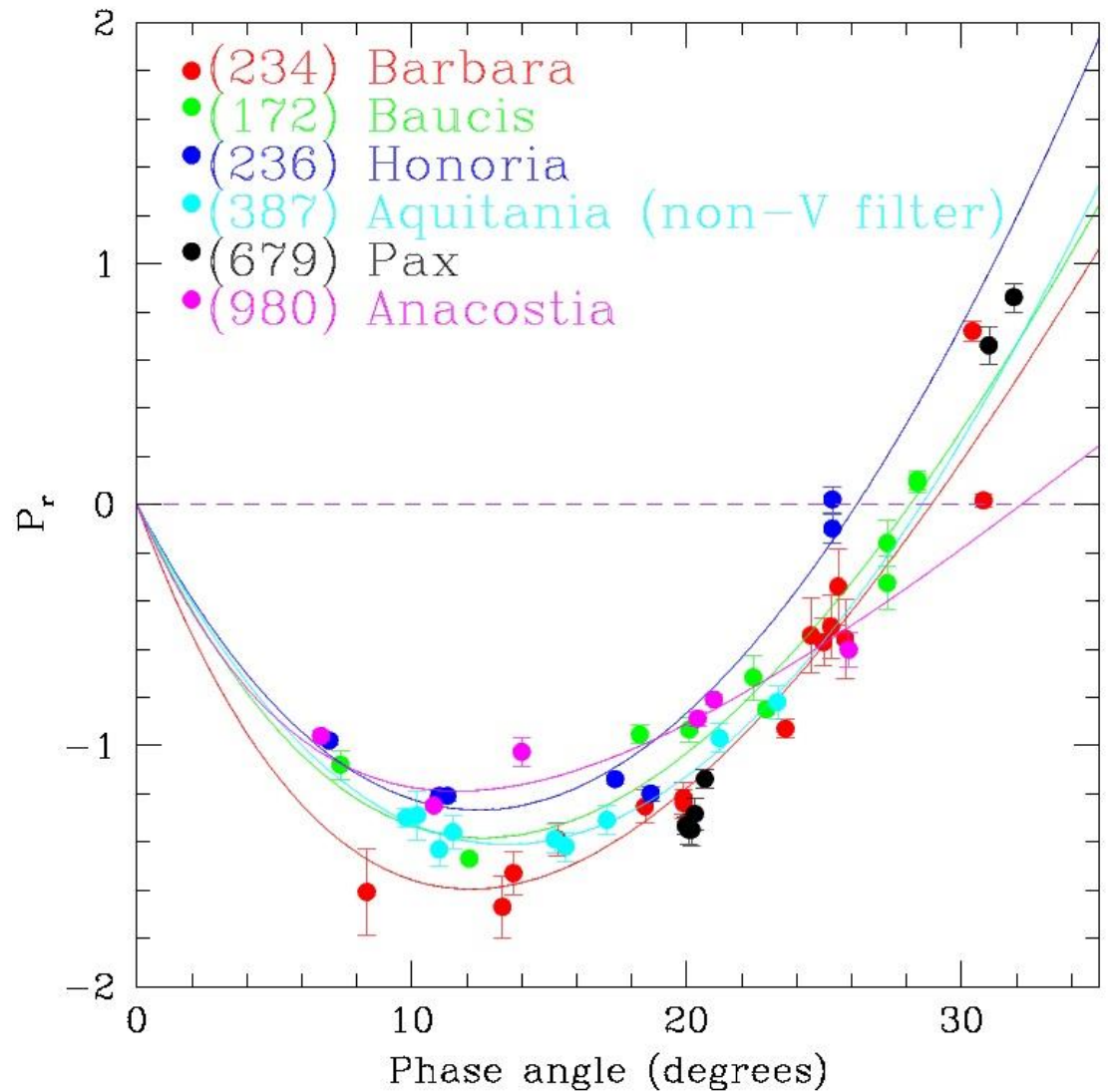


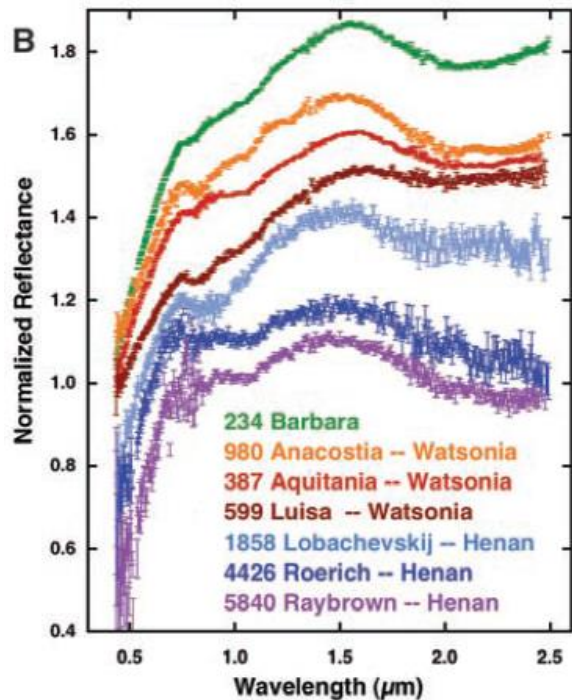
... E questi sono alcuni Barbari, chiamati così perchè simili al prototipo della classe, (234) Barbara.

**Polarizzazione fortemente negativa intorno a 20° di fase, dove gli asteroidi normali hanno la transizione dalla branca di polarizzazione negativa a quella positiva.**

**Valore molto alto dell'angolo di inversione!**

**Sono rari !**





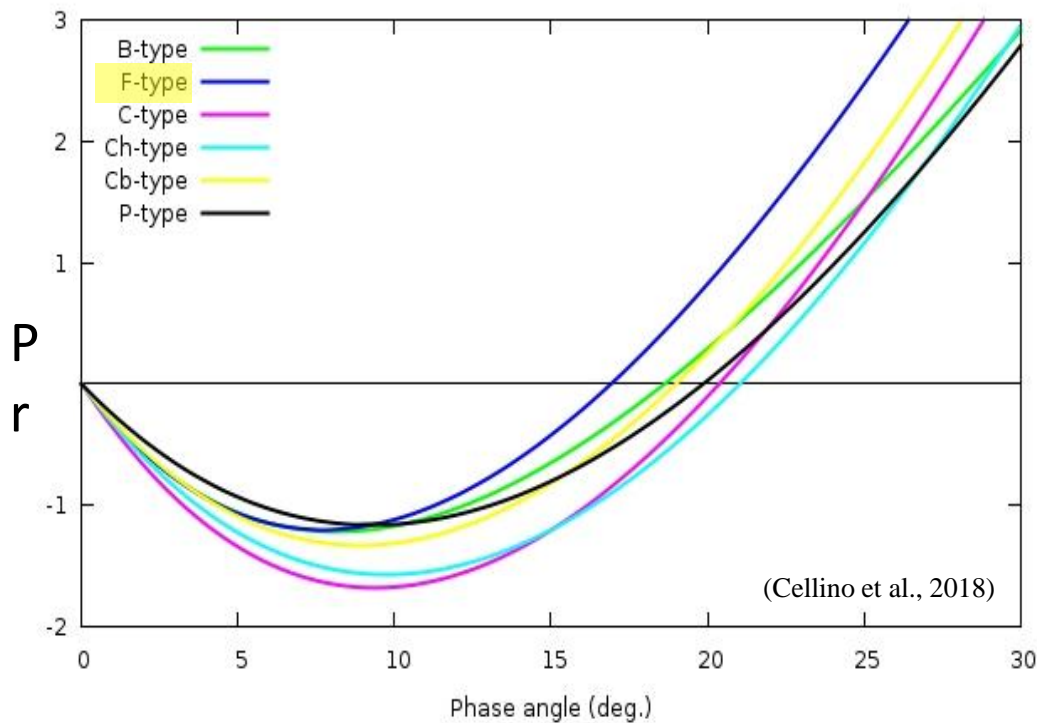
Spettri da Sunshine et al. (2008)

Object Id	Bus & Binzel Taxonomy	DeMeo et al. Taxonomy	Notes
(234) Barbara	Ld	L	Spinel-rich
(172) Baucis	L	-	
(236) Honoria	L	L	
(387) Aquitania	L	L	Spinel-rich Close to Watsonia
(402) Chloe	K	L	
(599) Luisa	K	L	Spinel-rich Close to Watsonia
(679) Pax	K	L	
(729) Watsonia	L	L	(Watsonia family)
(980) Anacostia	L	L	Spinel-rich Close to Watsonia
(1372) Haremari	-	-	(Watsonia family)
(2085) Henan	L	L	Spinel-rich. Family?
(5492) Thoma	L	-	(Watsonia family)
(42635), (56233), (106059), (106061), (144854), (236408)	-	-	(Watsonia family)
(36358), (51187), (53707), (56748), (75890), (76378), (82955), (87168), (103450), (116799)	-	-	(Brangäne family)

I Barbari hanno anomale abbondanze spettrali del minerale spinello  $[\text{Fe}, \text{Mg}]\text{Al}_2\text{O}_4$ . Questo si trova in molte inclusioni ricche di Calcio e Alluminio nelle meteoriti. Lo spinello è un minerale fortemente refrattario.

Questo suggerisce che I Barbari potrebbero essere rari sopravvissuti delle fasi più remote della storia del nostro Sistema Solare!

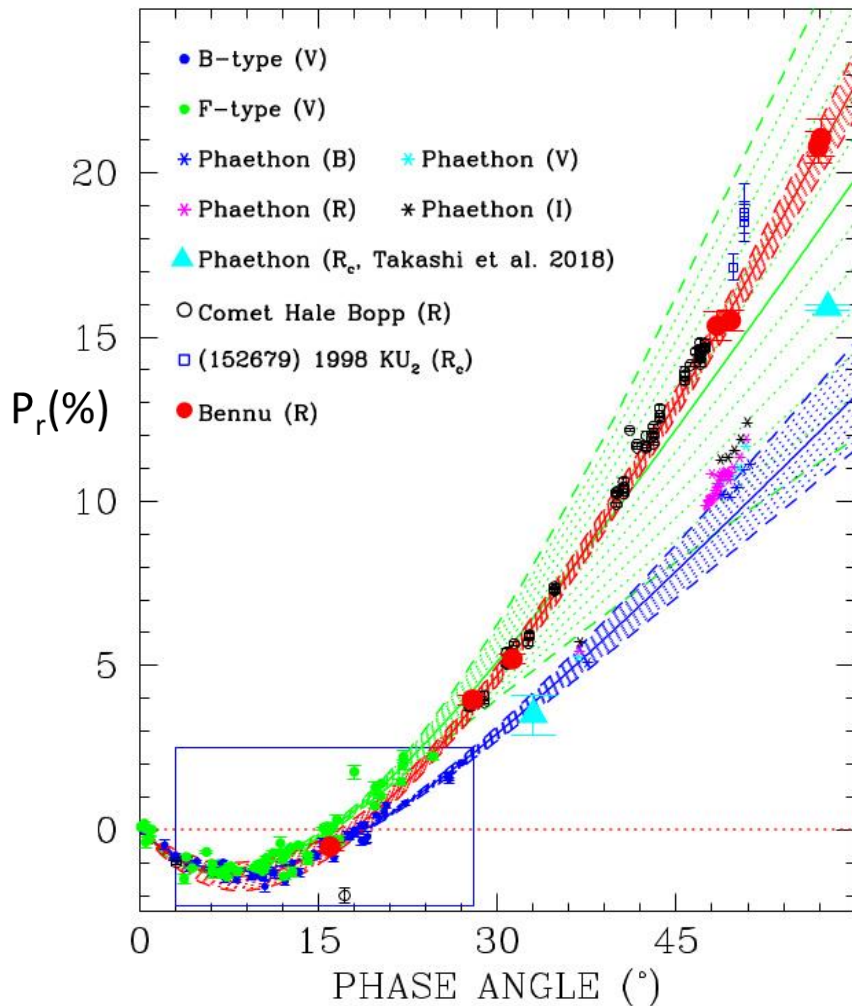
**Gli oggetti che appartengono alla vecchia classe tassonomica F esibiscono un comportamento polarimetrico peculiare, caratterizzato da valori molto bassi dell'angolo di inversione polarimetrica.**



**Angoli di inversione polarimetrica di diverse classi di asteroidi di bassa albedo**

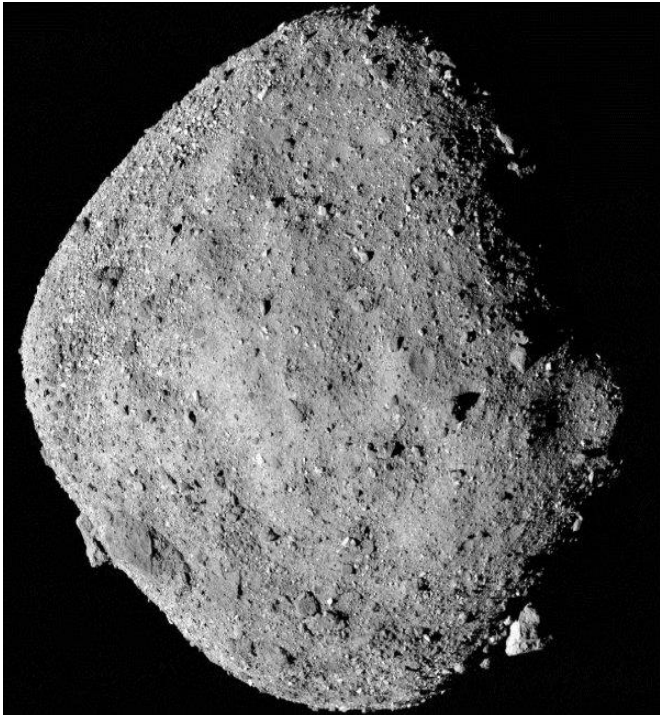
Alcuni oggetti di classe F hanno mostrato in passato o mostrano tuttora proprietà che fanno pensare ad un'origine cometaria (Phaethon, Wilson-Harrington).

Misure polarimetriche delle comete 2P/Encke (Boehnhardt et al. 2008) and 133P/Elst-Pizarro (Bagnulo et al., 2010), osservate in assenza di chioma, mostrano proprietà polarimetriche simili a quelle degli asteroidi F

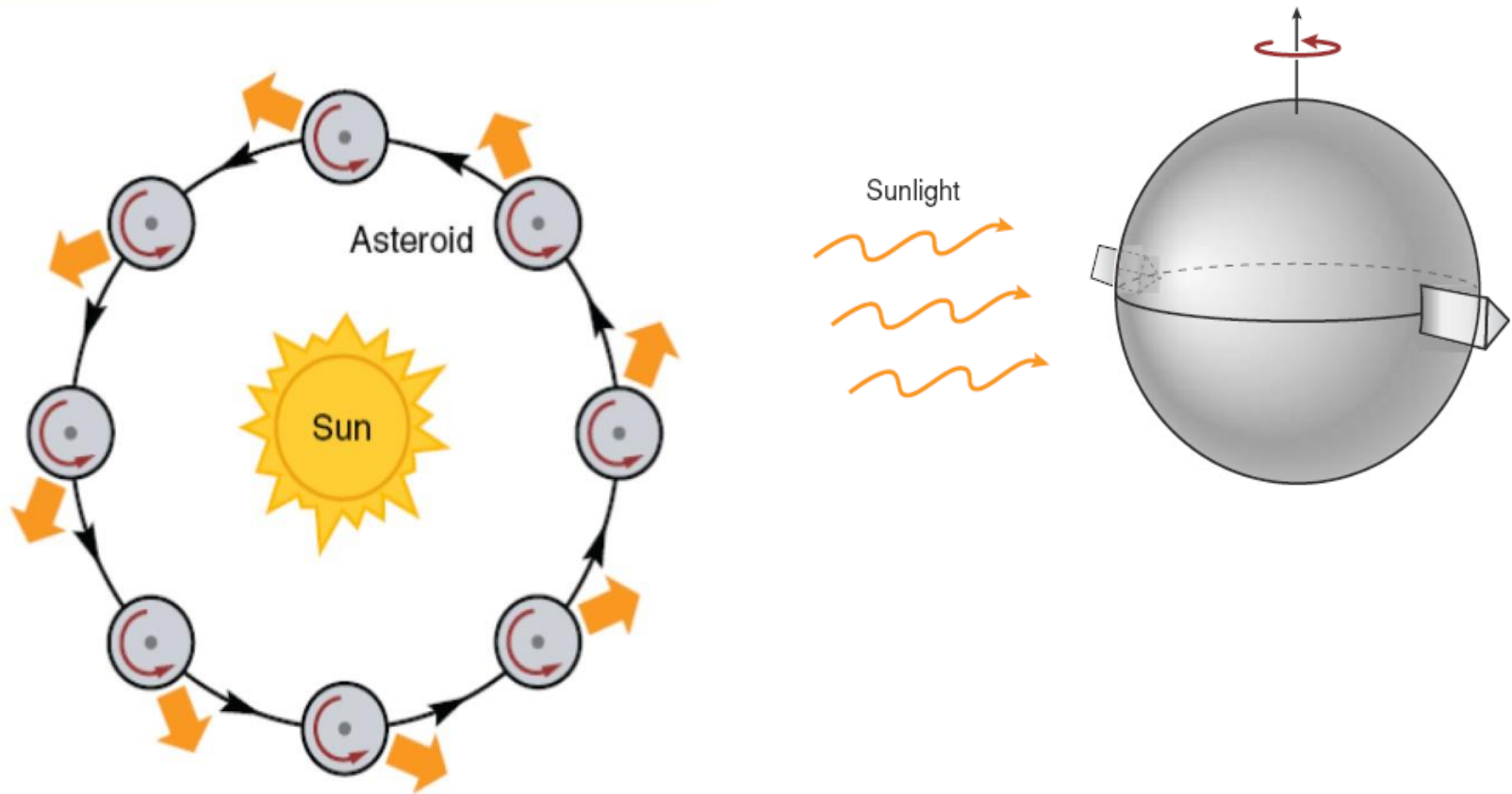


**(101955) Bennu,**  
**l'obiettivo della**  
**missione spaziale**  
**OSIRIS-Rex, è stato**  
**osservato in**  
**polarimetria, ed è**  
**stato trovato che**  
**mostra proprietà**  
**compatibili con la**  
**classe tassonomica F**

OSIRIS-REx ha trovato molti sassi in superficie,  
minerali idrati, albedo bassa  $p_v=0.046\pm0.005$ , ed  
emissione di materiale!



**Altre scoperte importanti: il grande legame tra la proprietà fisiche e dinamiche: l'effetto Yarkovsky e l'effetto YORP.**





## Il valore dell'accelerazione dovuta a Yarkovsky dipende da molti parametri fisici:

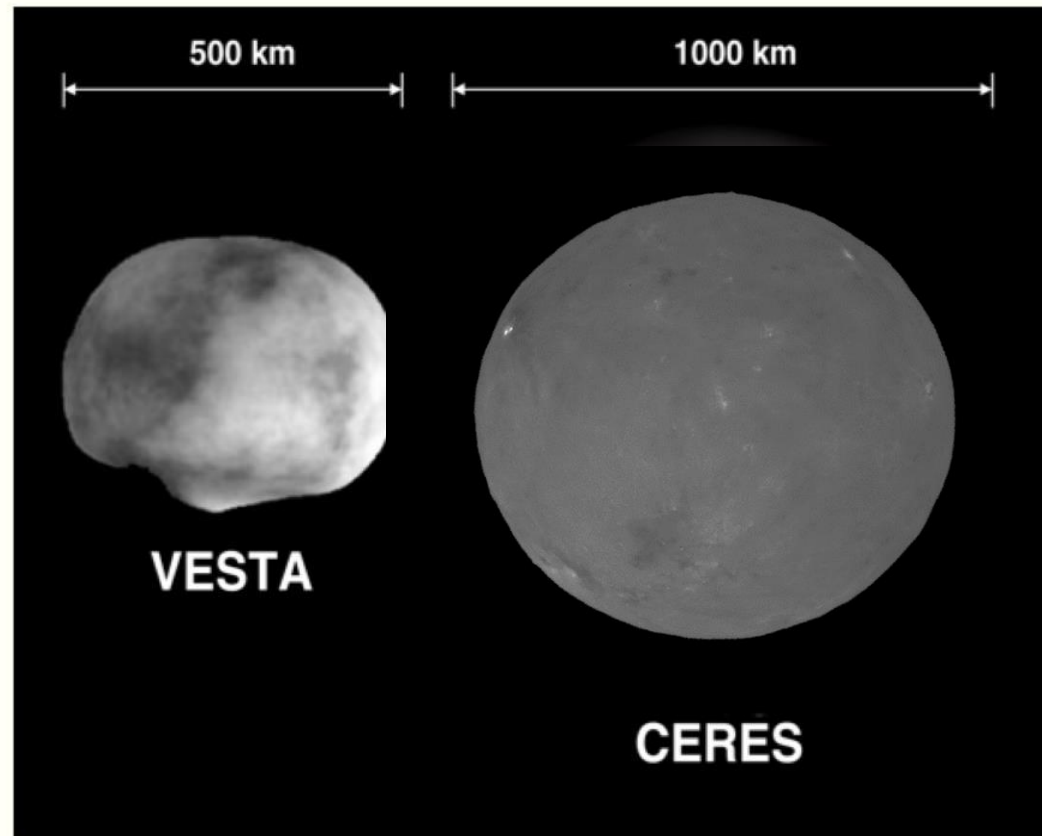
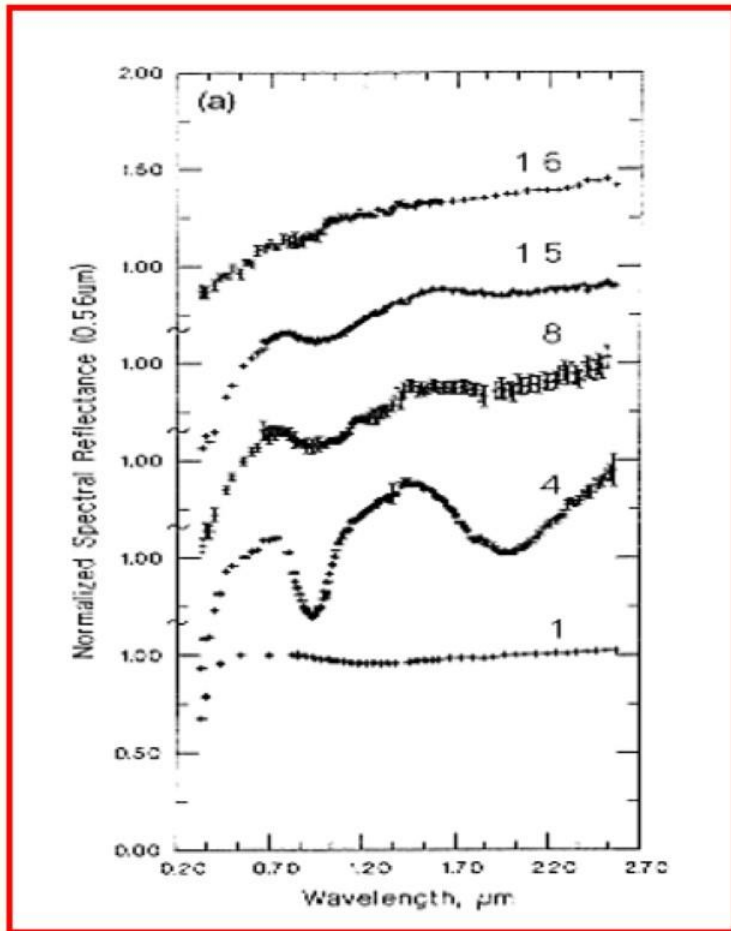
- Angolo di obliquità
- Periodo di rotazione
- Dimensioni (svanisce per diametri grandi o molto piccoli)
- Condittività superficiale (inerzia termica)
- Distance eliocentrica:  $(da/dt) \approx a^{-2}$

Gran bell'esempio di un legame tra proprietà fisiche e dinamiche (moto orbitale) degli oggetti. Il problema è che l'effetto è intrinsecamente assai complicato.

La scoperta *in situ* del primo asteroide binario: Ida

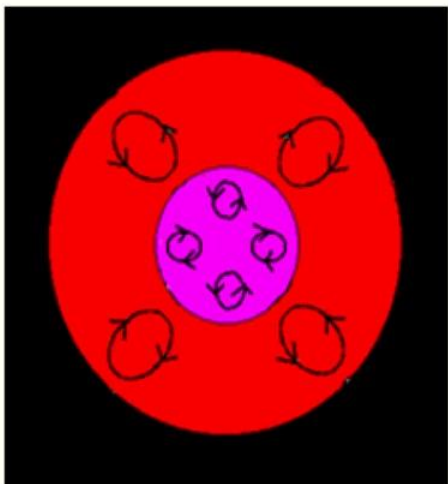


# Cerere e Vesta: il grande paradosso

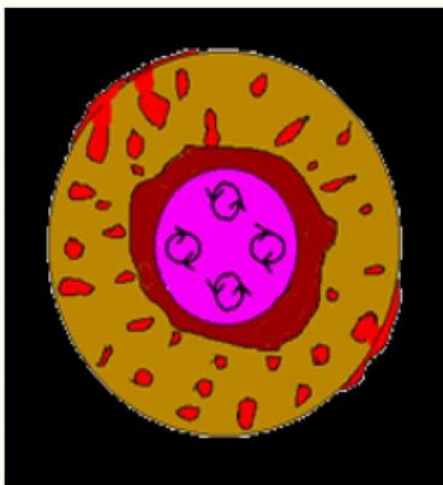


Il grosso Problema: Perchè sono così diversi?

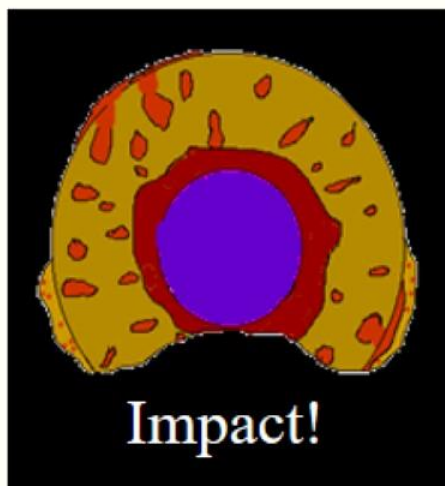
Poco dopo la sua formazione, Vesta fuse quasi completamente e si differenziò. Sorgenti probabili di calore: nuclei instabili come  $Al^{26}$



Eruzioni vulcaniche ricoprirono la superficie di Vesta di lava, formando una crosta basaltica



Formazione di un grosso cratere e della famiglia dinamica di Vesta (asteroidi di classe V).



Una breve storia di Vesta

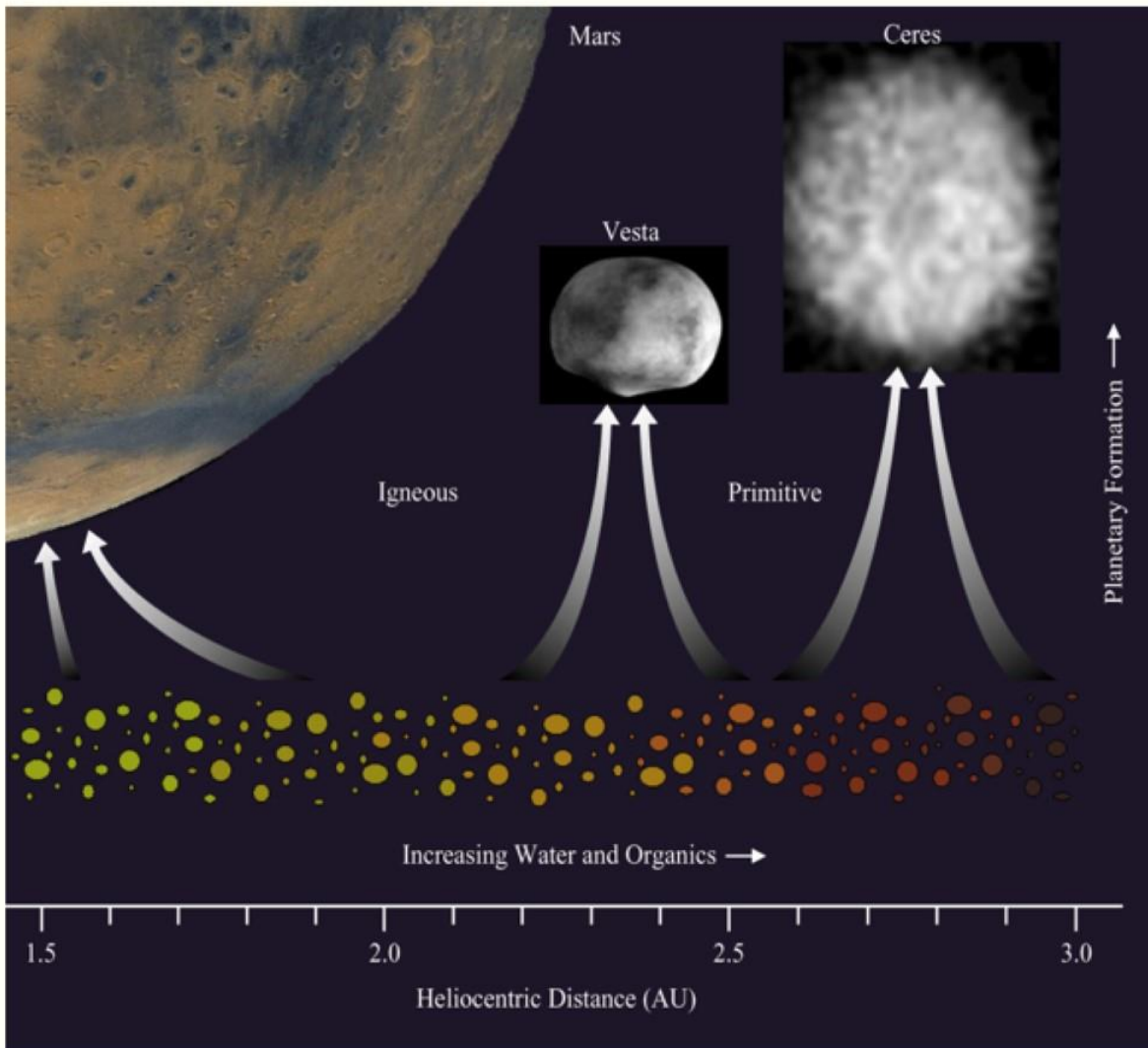


## Proprietà di Cerere

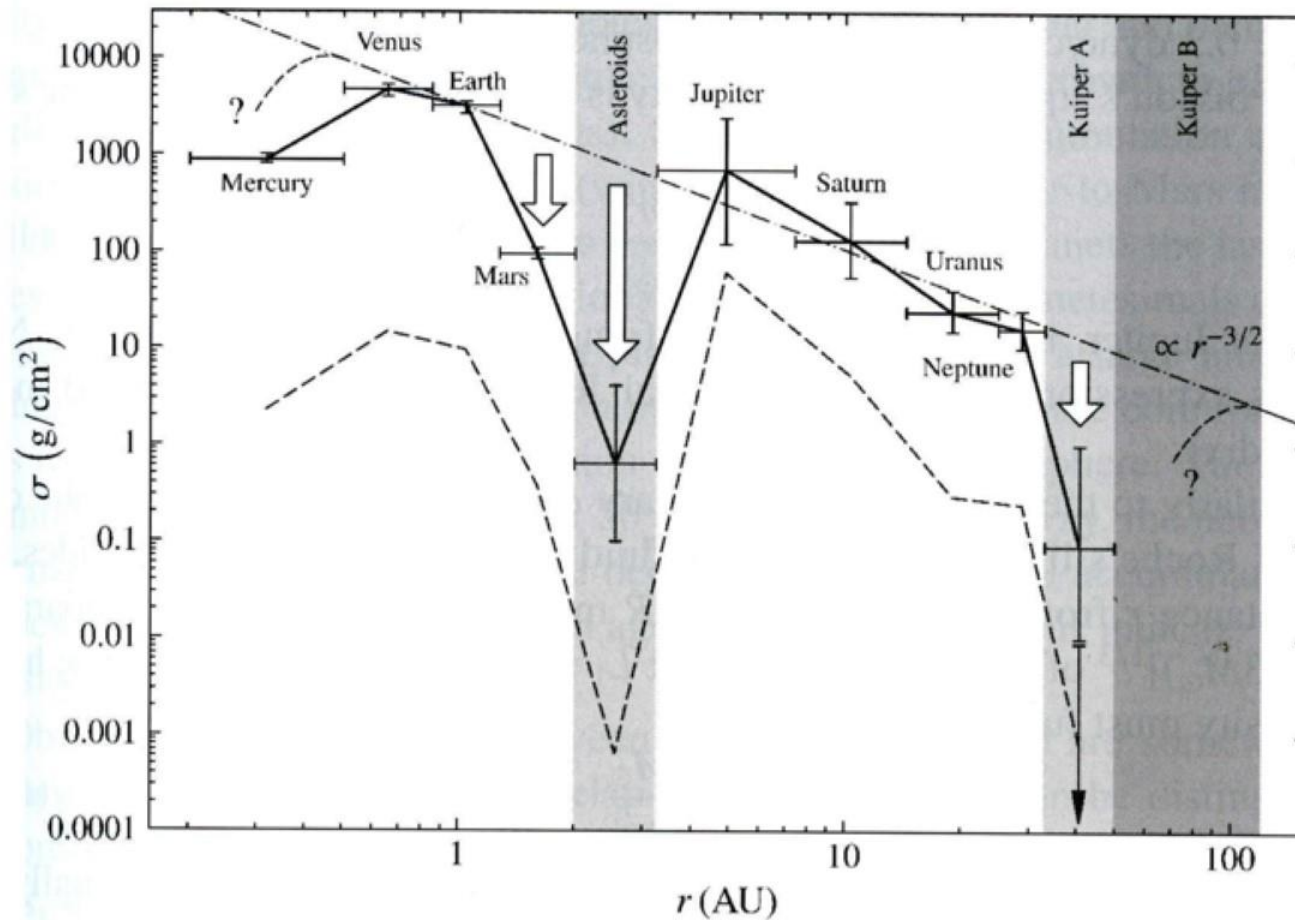
- Cerere è un nano-pianeta.
- Contiene gran parte della massa tra Marte e Giove
- Spettroscopicamente simile alle meteoriti primitive dette Condriti Carbonacee.
- Ghiaccio d'acqua e minerali argillosi forse presenti in superficie
- Ceres è una sorgente possibile di condriti carbonacee, che sono i corpi più antichi che conosciamo nel nostro Sistema Solare

**Come è possibile ?**

Essendo grande il doppio di Vesta, Cerere dovrebbe essersi accresciuto più in fretta. Se era fatto dello stesso materiale di Vesta, avrebbe dovuto anch'esso fondersi e differenziarsi. E' possibile che una differenza ragionevole di composizione iniziale possa spiegare questo paradosso ?

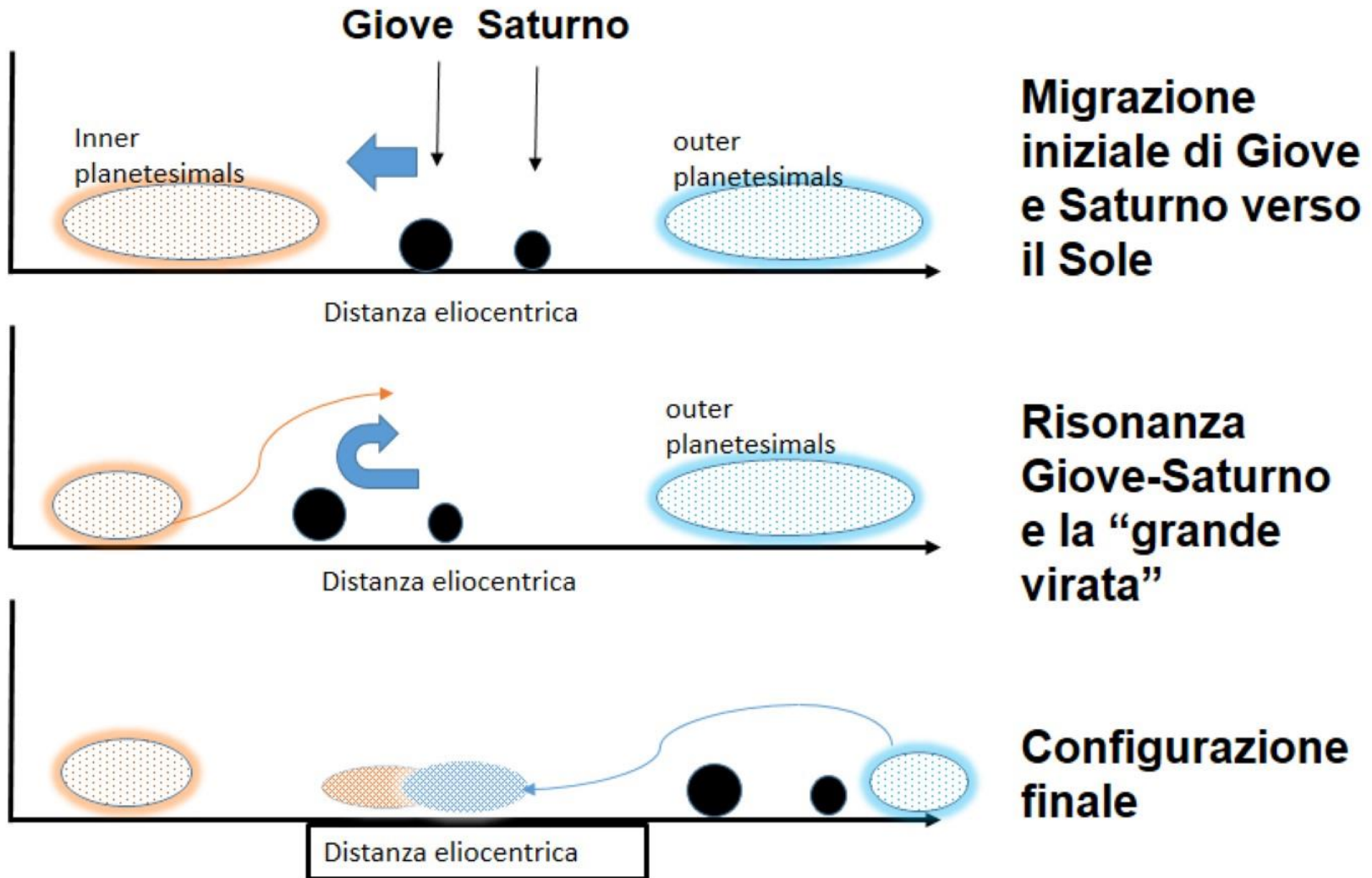


# Origine ed evoluzione.



La regione occupata dalla cintura degli asteroidi è fortemente depauperata di massa.

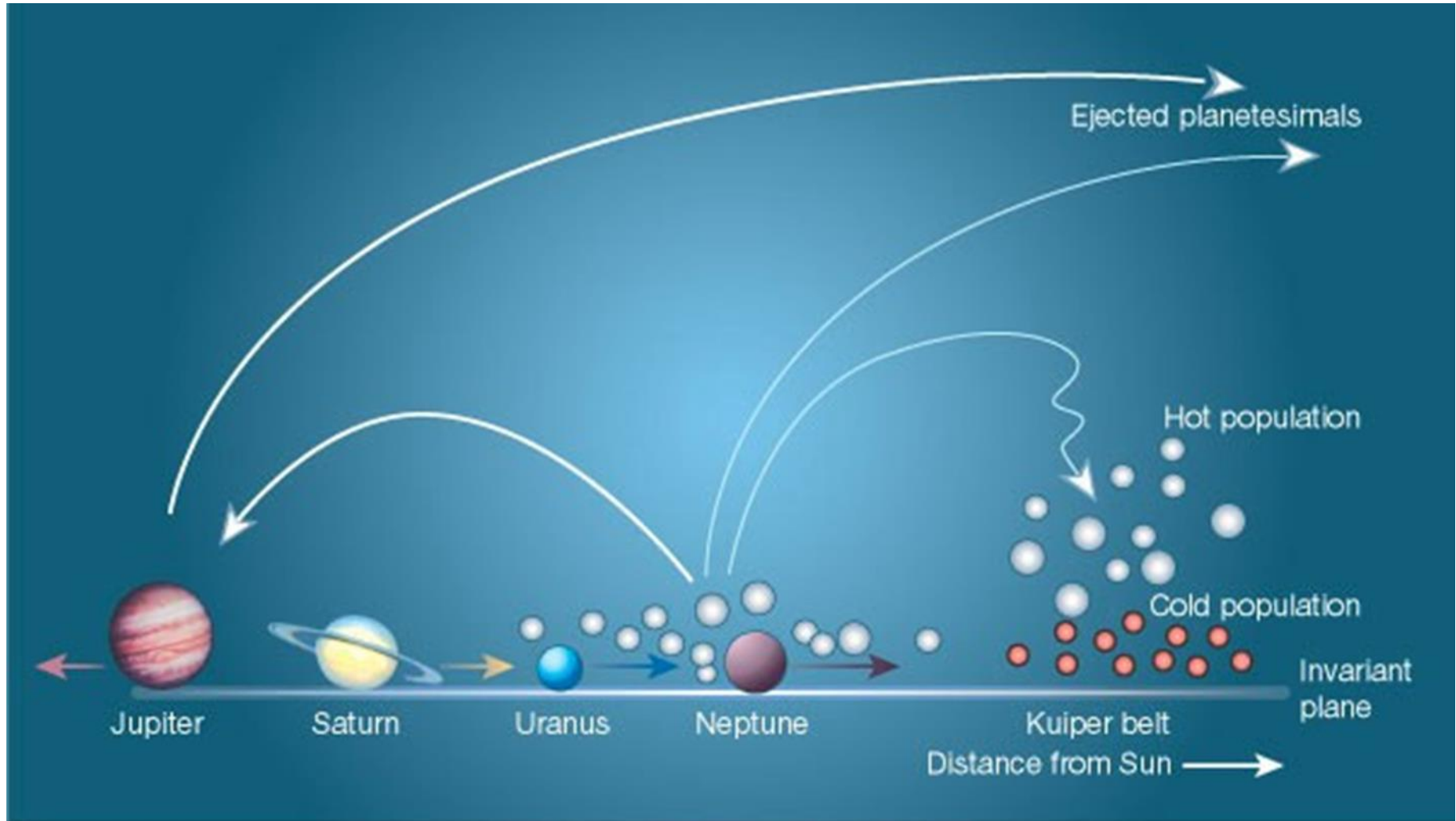
# Modello teorico detto del “Grand Tack”

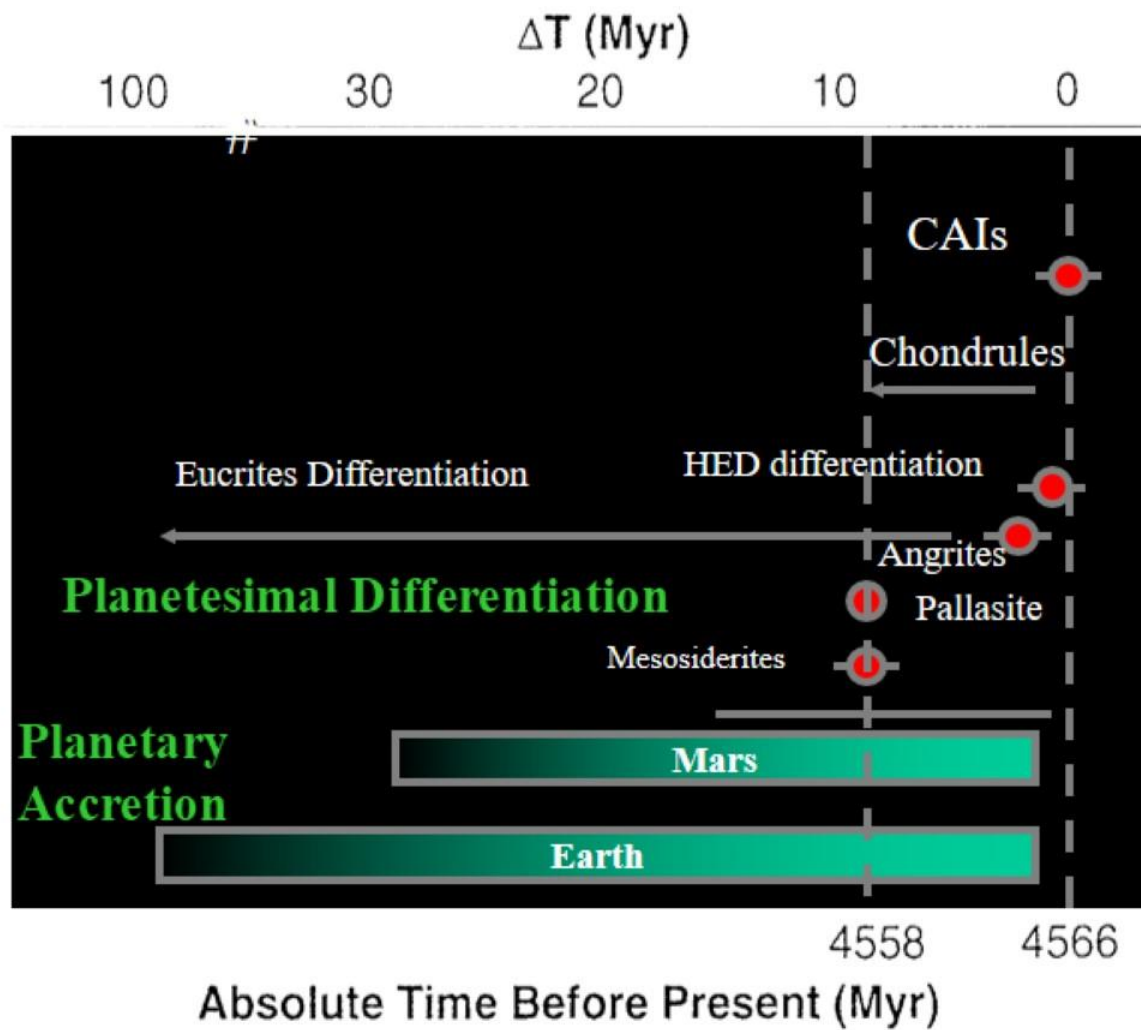


Questo processo spiega anche la massa modesta di Marte.



# Questo scenario spiega genericamente anche le diverse categorie di oggetti trans-nettuniani





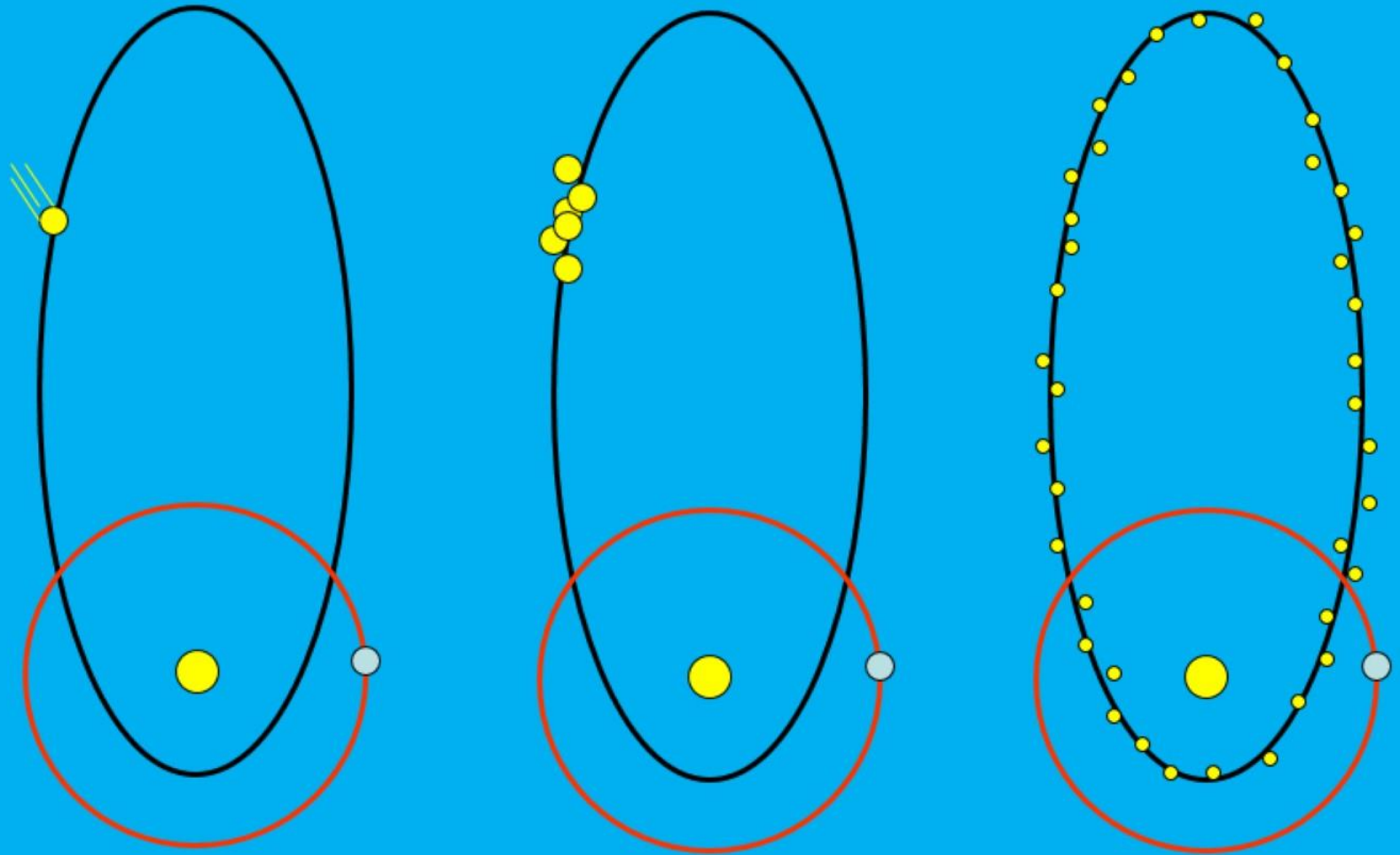
# Meteore, meteoriti, impatti

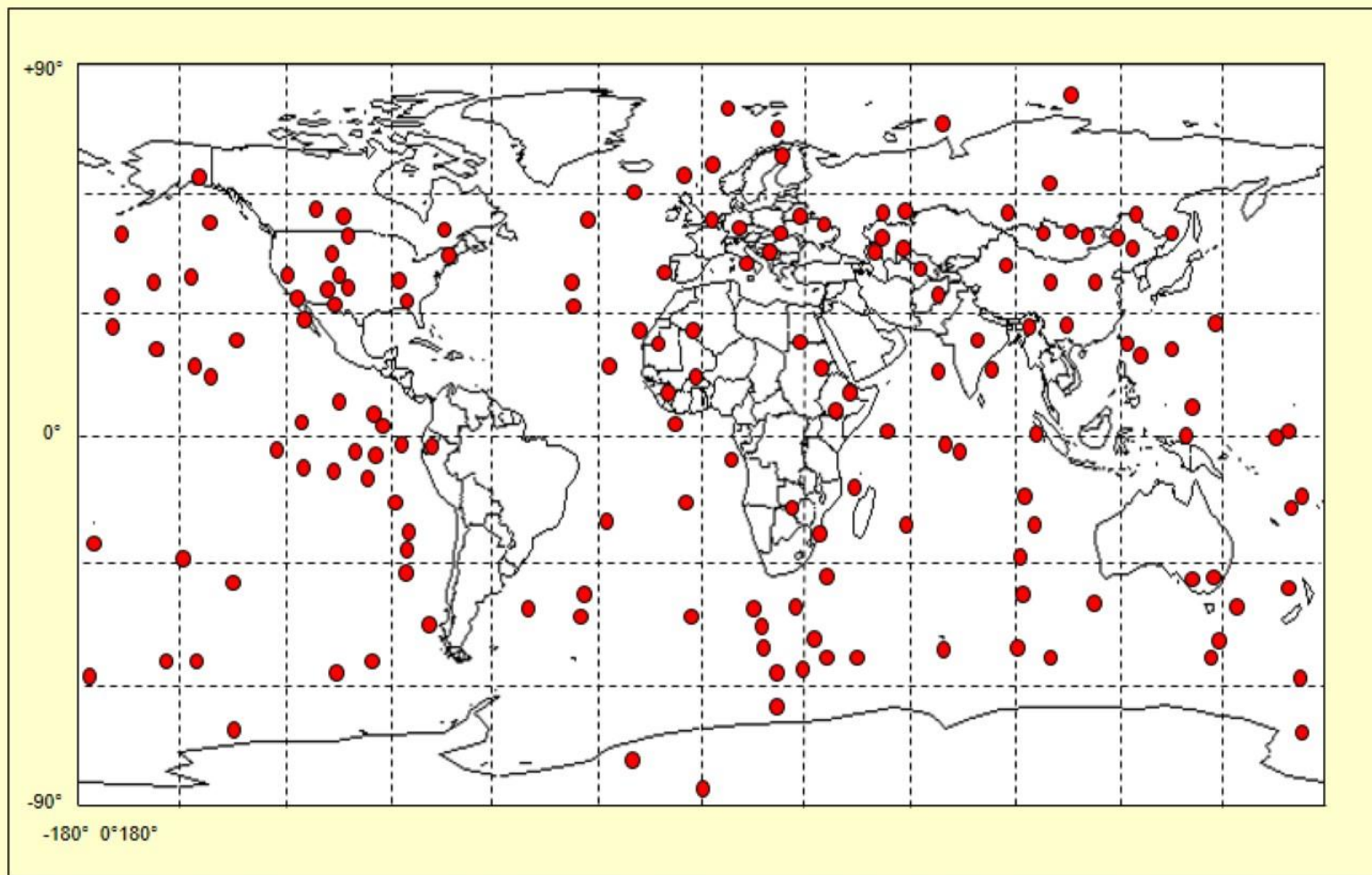




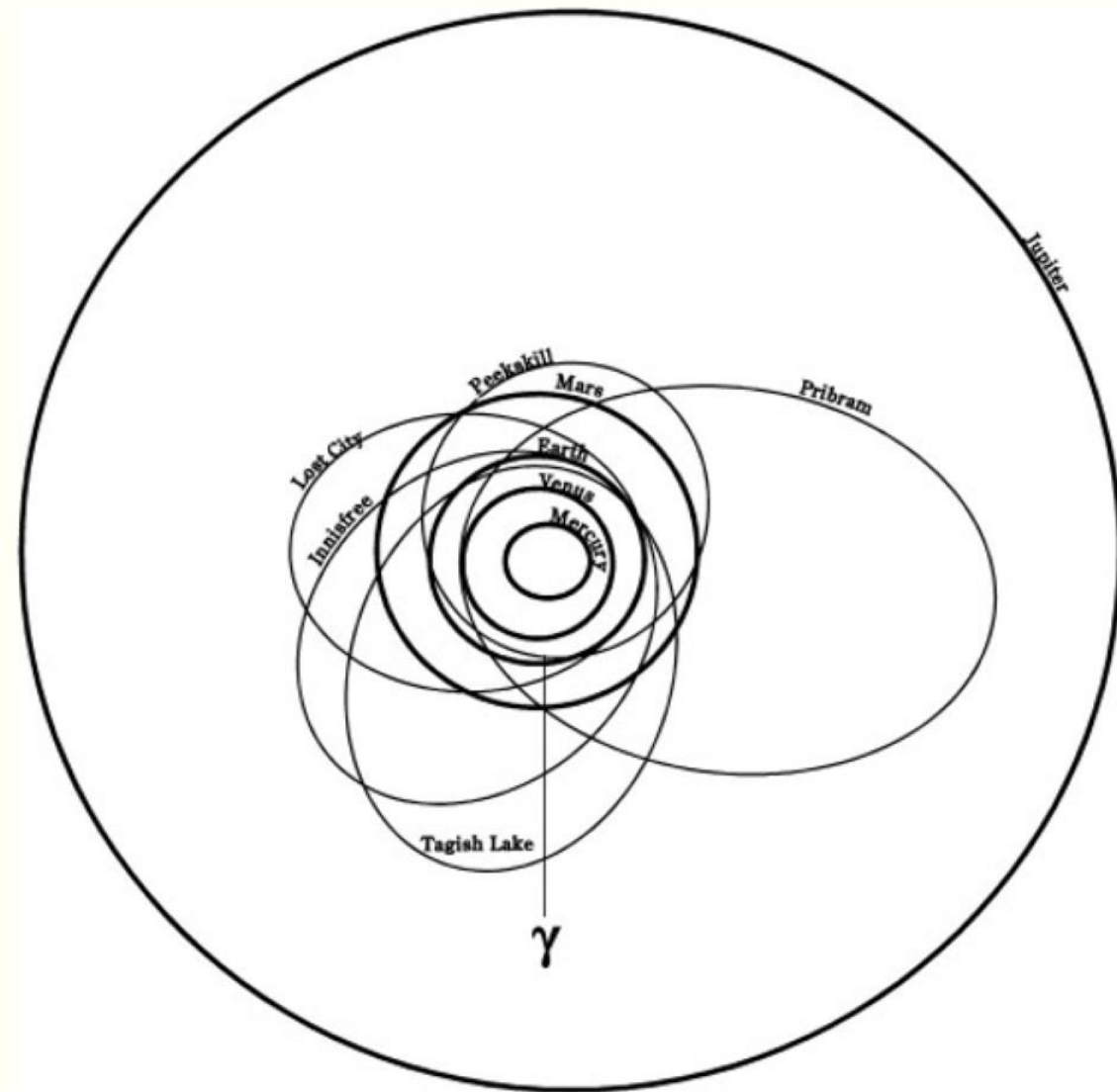
**Esempio di meteora sporadica**

# Origine cometaria dei principali sciami di meteore





*Eventi ottici in atmosfera con energie > 1 kT rilevati da sensori a bordo di satelliti tra il 1975 e il 1997*



Le orbite di 5 meteoriti che sono stati visti produrre “fireballs” in atmosfera.  
[Brown et al., 2000]

In tutti i casi conosciuti, l'afelio dell'orbita dell'oggetto era nella cintura principale degli asteroidi.



Se le meteoriti provengono dalla cintura principale, alcuni dei campioni di materiale più antico del Sistema Solare che abbiamo nei laboratori, sono pezzi di asteroidi



**Wolf Creek Crater, Western Australia**  
**Età = 300,000 anni, Diametro = 850 m**

**CI SONO 150 AREE DI IMPATTO  
RICONOSCIBILI SULLA TERRA**

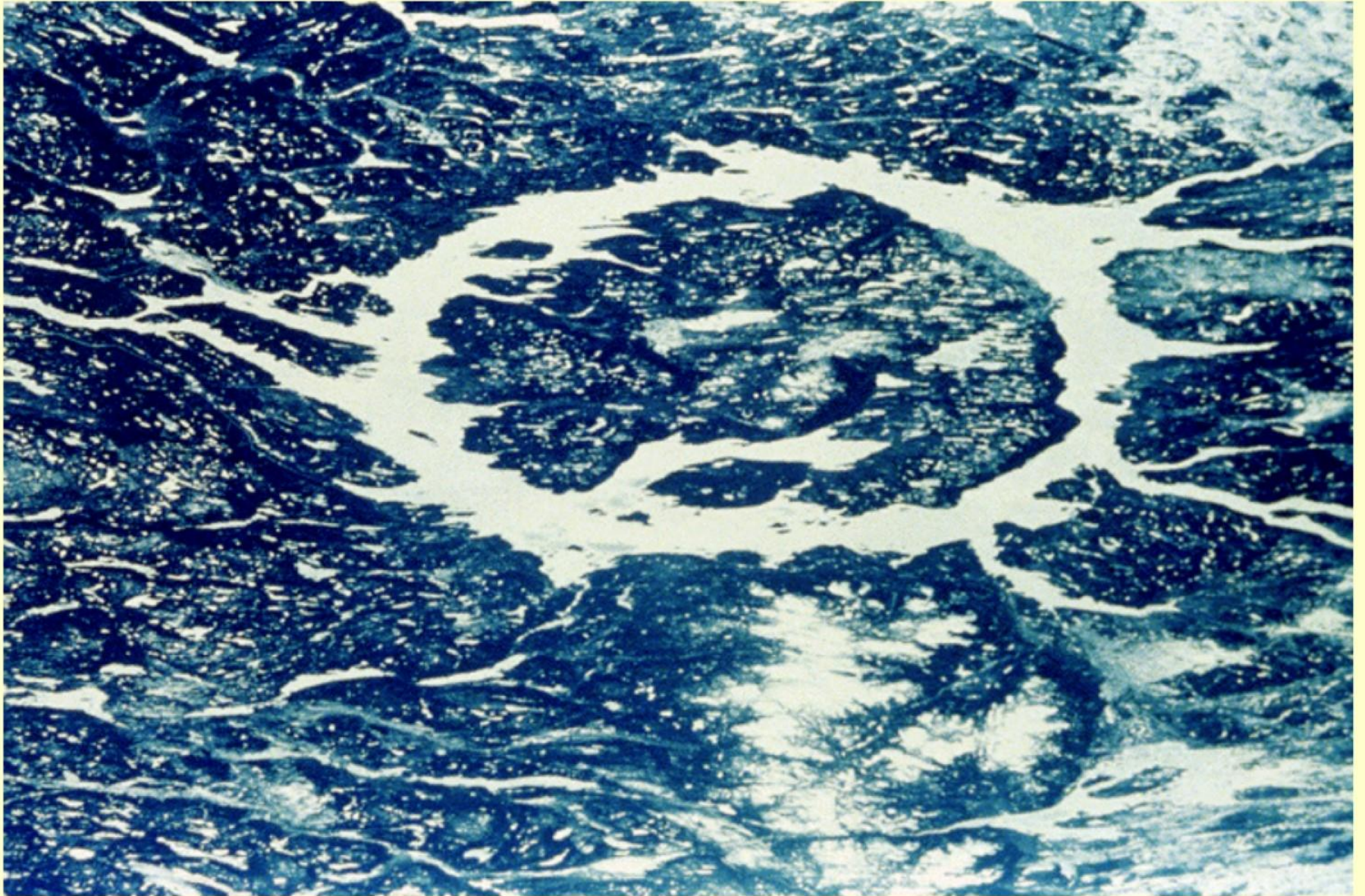




**Evento di Tunguska : 30 giugno 1908**  
**Area devastata = 2000 km<sup>2</sup>**

**Barringer Crater, Arizona, USA**  
**Età = 49000 anni, Diametro = 1.2 km**





**Manicouagan Crater, Quebec, Canada, Diametro = 100 km**

# FREQUENZE DI IMPATTO SULLA TERRA



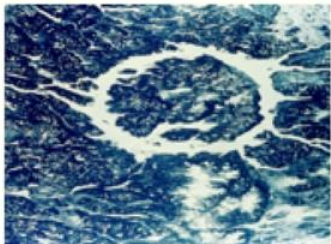
**TIPO TUNGUSKA (15 MT): 1 ogni < 1000 anni**

**Evento Tunguska: 30 giugno 1908. Area devastata = 2000 km<sup>2</sup>**



**CATASTROFI REGIONALI (10,000 MT):  
1 ogni 100000 anni**

**Wolf Creek Crater, Western Australia. Et  = 300000 anni, Diametro = 850 m**



**CATASTROFI GLOBALI (>1,000,000 MT): 1 ogni  
1-10 milioni di anni**

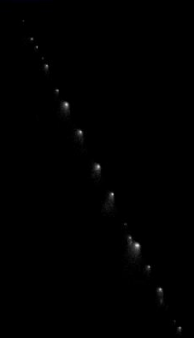
**Manicouagan Crater, Québec, Canada, Diametro = 100 km**

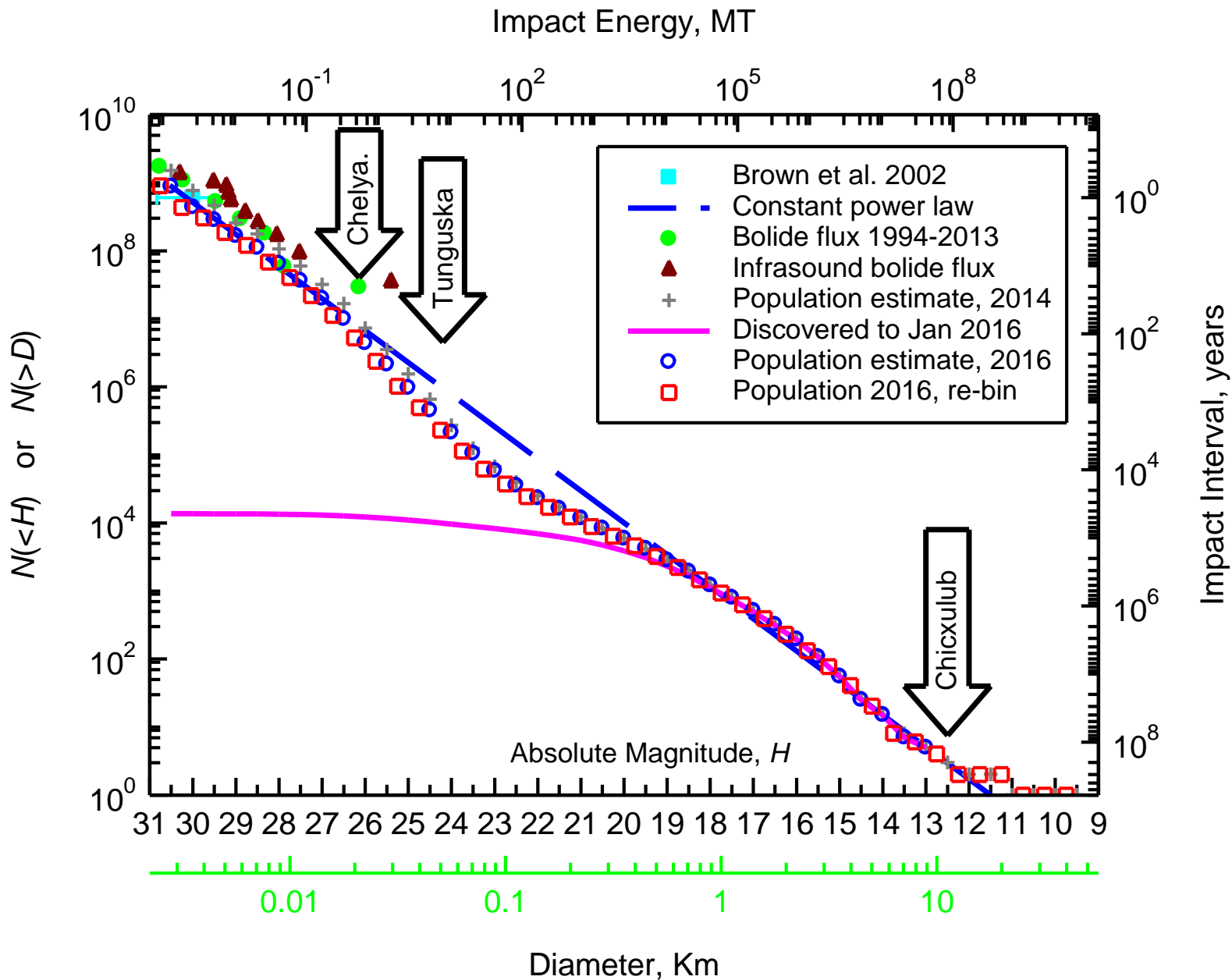
Comet P/Shoemaker-Levy 9 (1993e) • May 1994



Hubble Space Telescope • Wide Field Planetary Camera 2

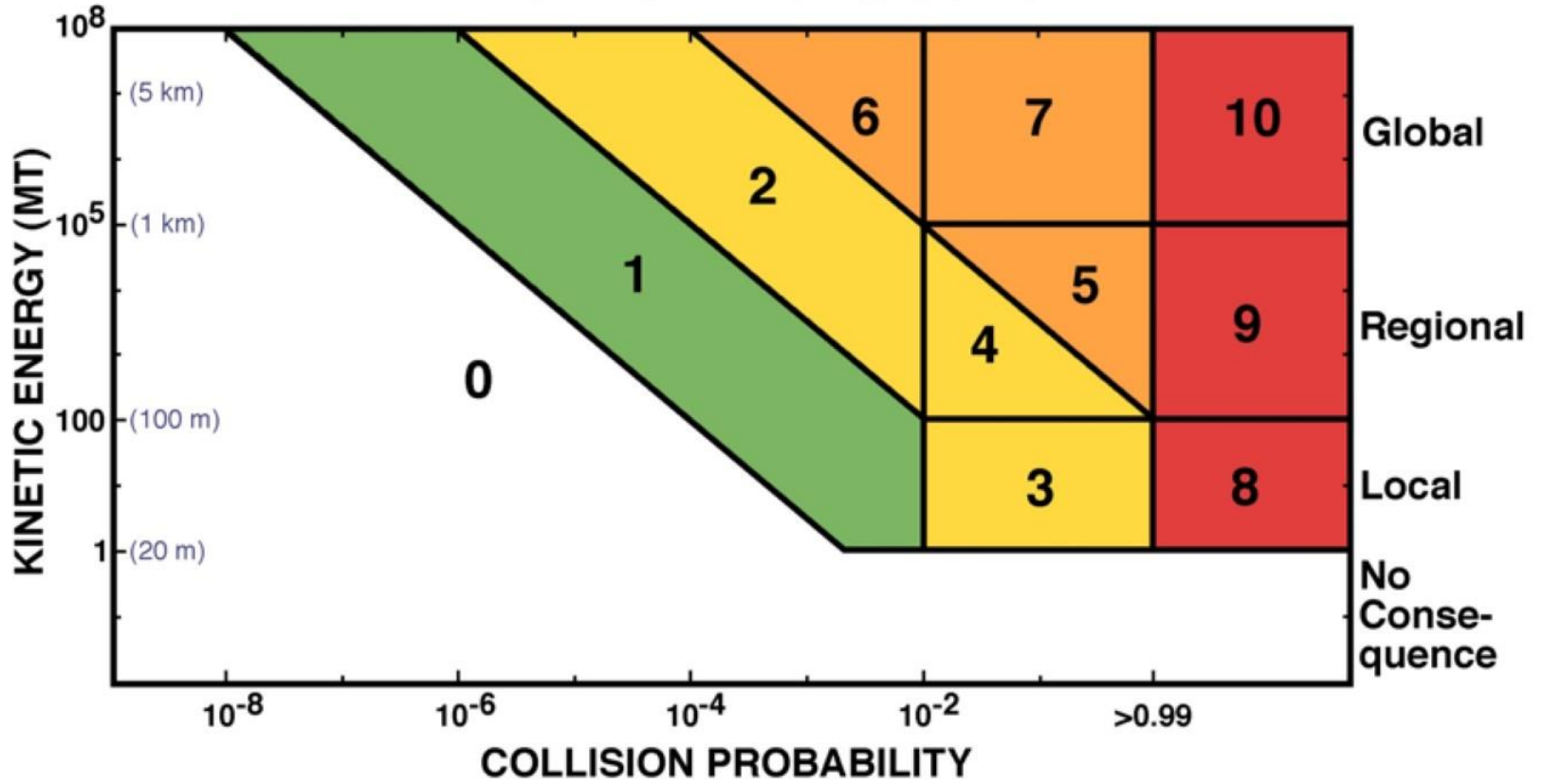
Il celebre impatto della  
cometa Levy-Shoemaker 9  
con Giove





(cortesia di Alan W. Harris)

# The Torino Scale



Events having no likely consequences.



Events meriting careful monitoring.



Events meriting concern.

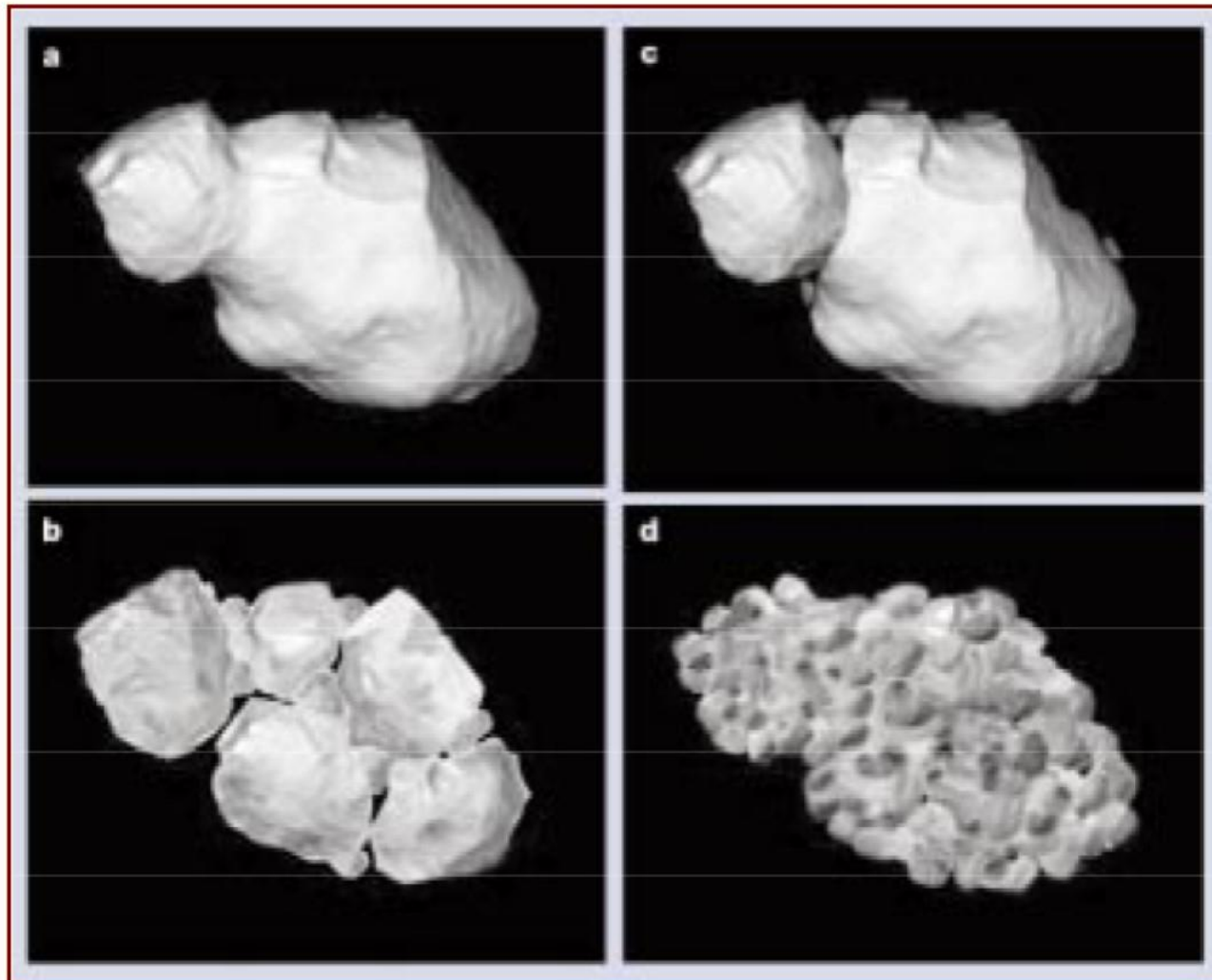


Threatening events.



Certain collisions.

# La grande domanda per le tecniche di difesa: Come sono fatti dentro?



???



## Riassumendo:

*I corpi minori sono interessanti e mostrano grande diversità.*

Includono oggetti con storie diverse, e che hanno alle spalle evoluzioni termiche molto diversificate.

Forniscono campioni del materiale più primitivo del nostro Sistema Solare.

Ruolo delle collisioni e di effetti non-gravitazionali.

Sistemi binari non sono rari.

**Problemi aperti:** Inventario e distribuzione di massa; paradosso Cerere-Vesta; strutture interne; effetto Yarkovsky e YORP; masse e densità; rischio di impatto e strategie di difesa, ecc., *solo limitandosi agli asteroidi.*

# Grazie

