

Astrofizyka Układów Planetarnych

8

PLANETARNY DROBIAZG

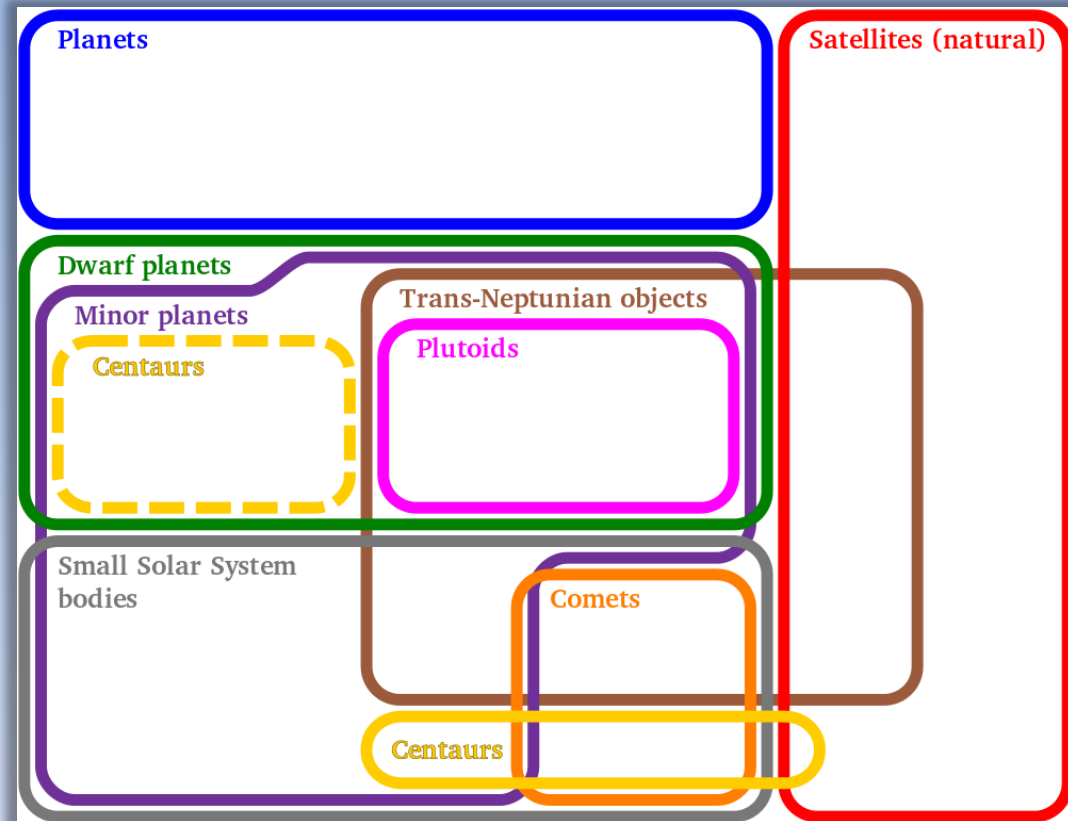
The background of the slide is black, featuring a complex pattern of glowing, multi-colored lines. These lines, in shades of orange, red, and white, radiate from a central point on the right side of the frame, creating a sense of dynamic energy and depth. The lines vary in thickness and brightness, some appearing as sharp, bright streaks while others are more diffuse and glowing.

Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

Nazewnicy mętlik

Jak nazywane są obiekty mniejsze od planety (karłowatej)?

- planetoida (asteroid)
- planetka (minor planet)
- planetula
- meteoroid
- kometa
- *planetozymal*
- *protoplaneta*



Wszystkie obiekty okrążające bezpośrednio Słońce i nie będące planetami (karłowatymi) powinny być nazywane **małymi ciałami Układu Słonecznego** (IAU, 2006).

Czy komety, planetoidy i obiekty transneptunowe są rozdzielnymi typami obiektów?

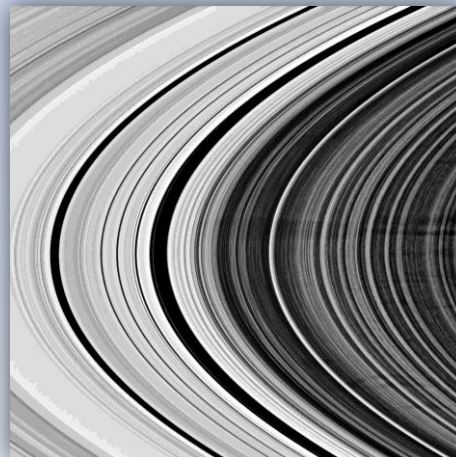
Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

Planetarny drobiazg

- małe ciała Układu Słonecznego:
 - planetoidy
 - odległe planetoidy
 - meteoroidy
 - *komety??*
- pierścienie
- pył i gaz międzyplanetarny

pozostałe obiekty Układu Słonecznego:

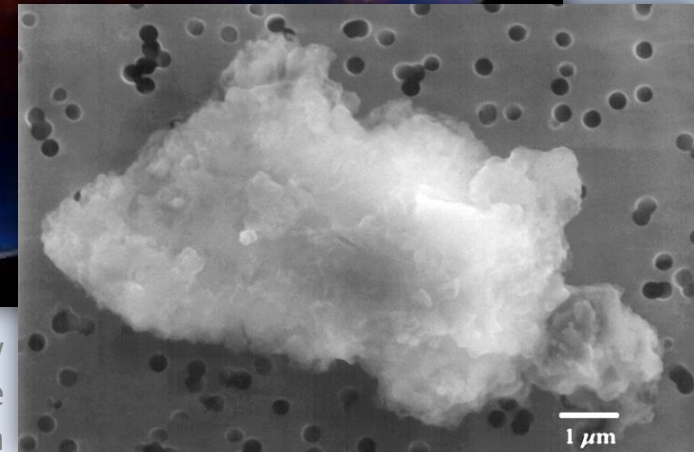
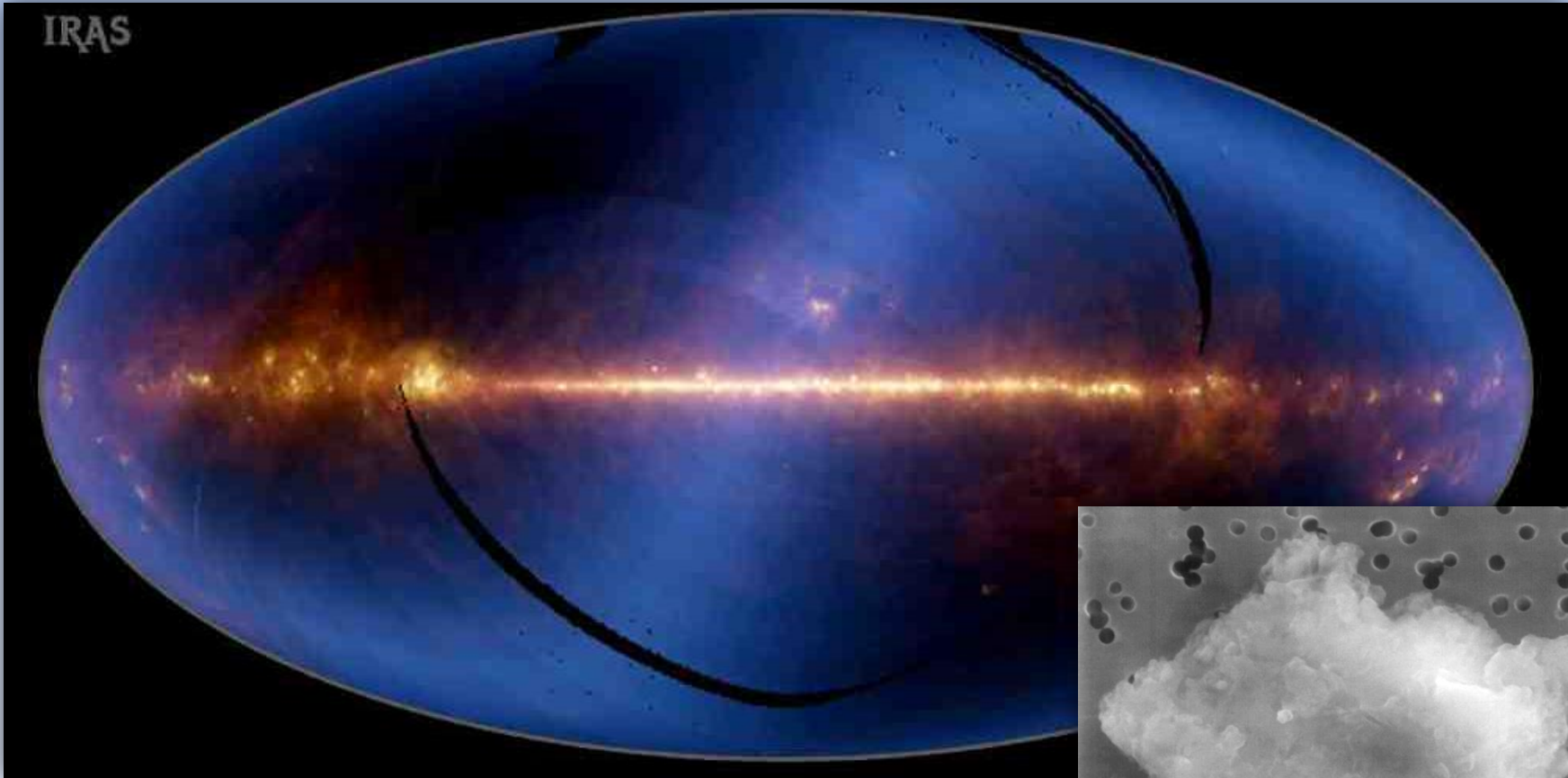
planety, planety karłowate, księżyce, Słońce



Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

pył międzyplanetarny

- Przestrzeń międzyplanetarną wypełniają ziarna pyłu o rozmiarach do 0.1 mm.
- Wykazują one koncentrację ku płaszczyźnie orbit planet.
- Źródłem pyłu są zderzenia małych ciał, aktywność kometarna i Mars (?) (nie jest to pył pierwotny).



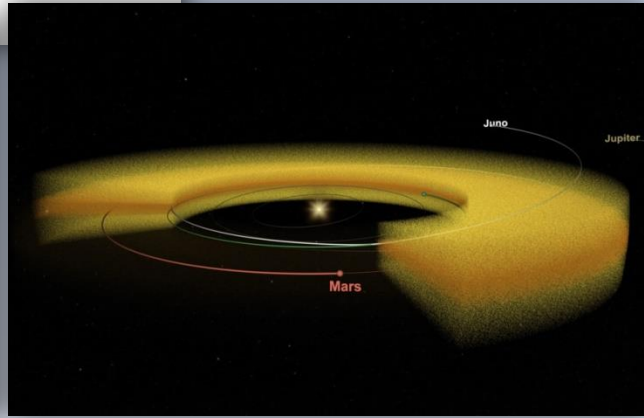
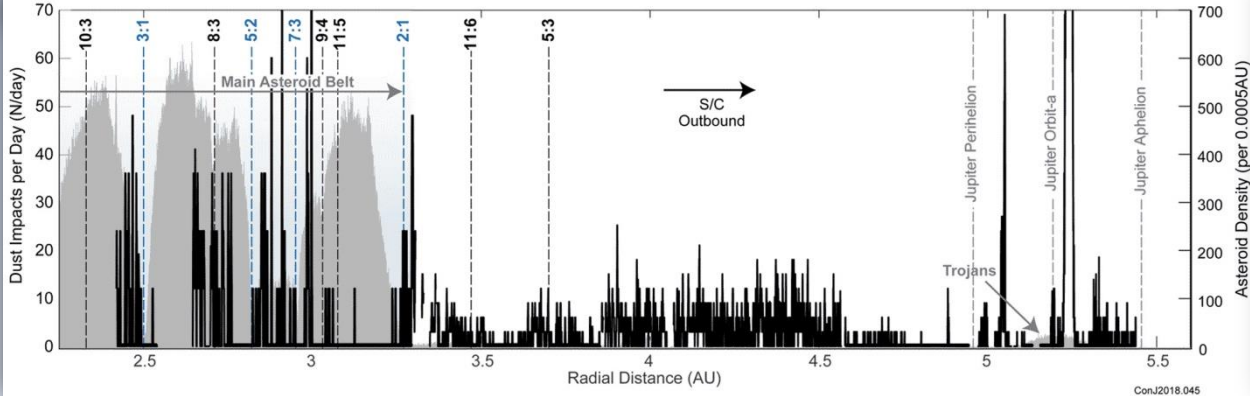
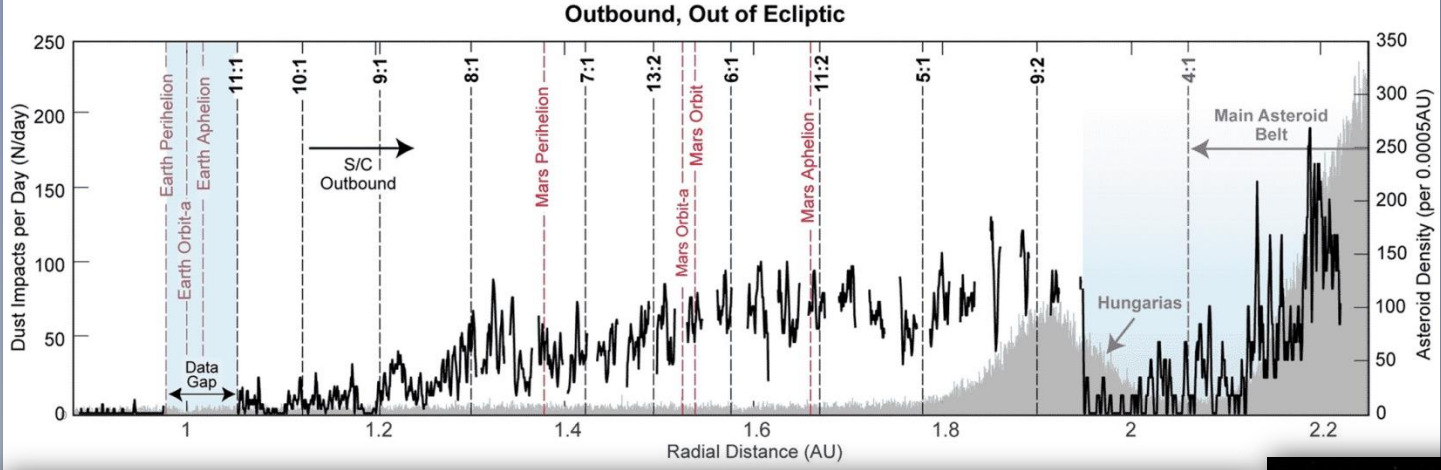
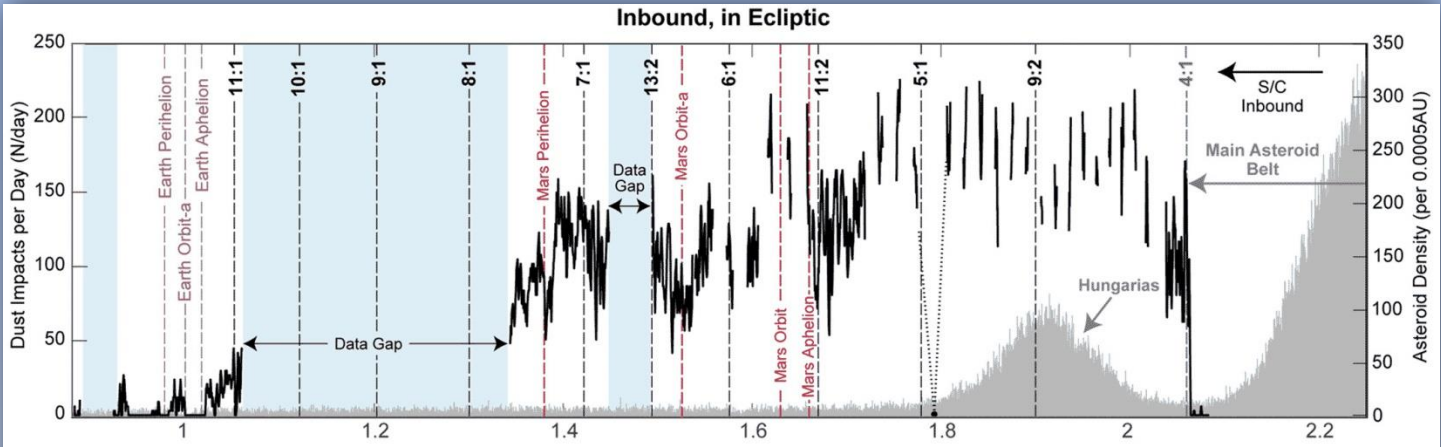
Obraz całego nieba w podczerwieni (satelita IRAS).
Widoczne rozmyte świecenie termiczne pyłu.

Ziarno pyłu w
mikroskopie
elektronowym

Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

Mars źródłem pyłu międzyplanetarnego?
(pomiary z sondy Juno i wizualizacja)

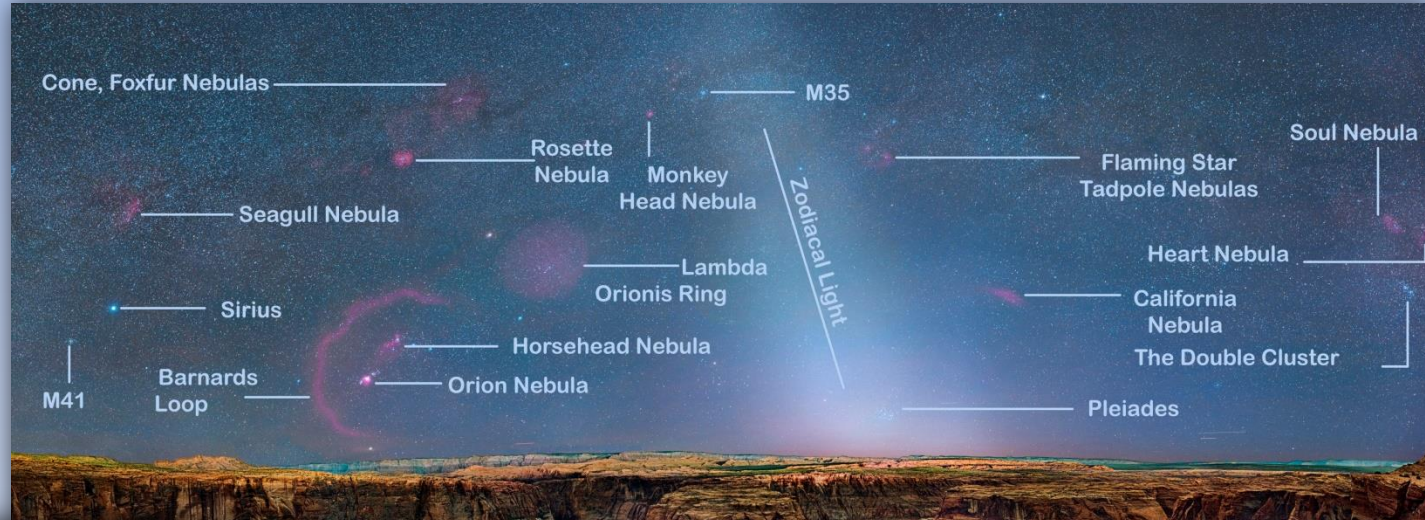
Jorgensen, J. L., i in.,
Journal of Geophysical
Research: Planets, 2021



Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

pył międzyplanetarny

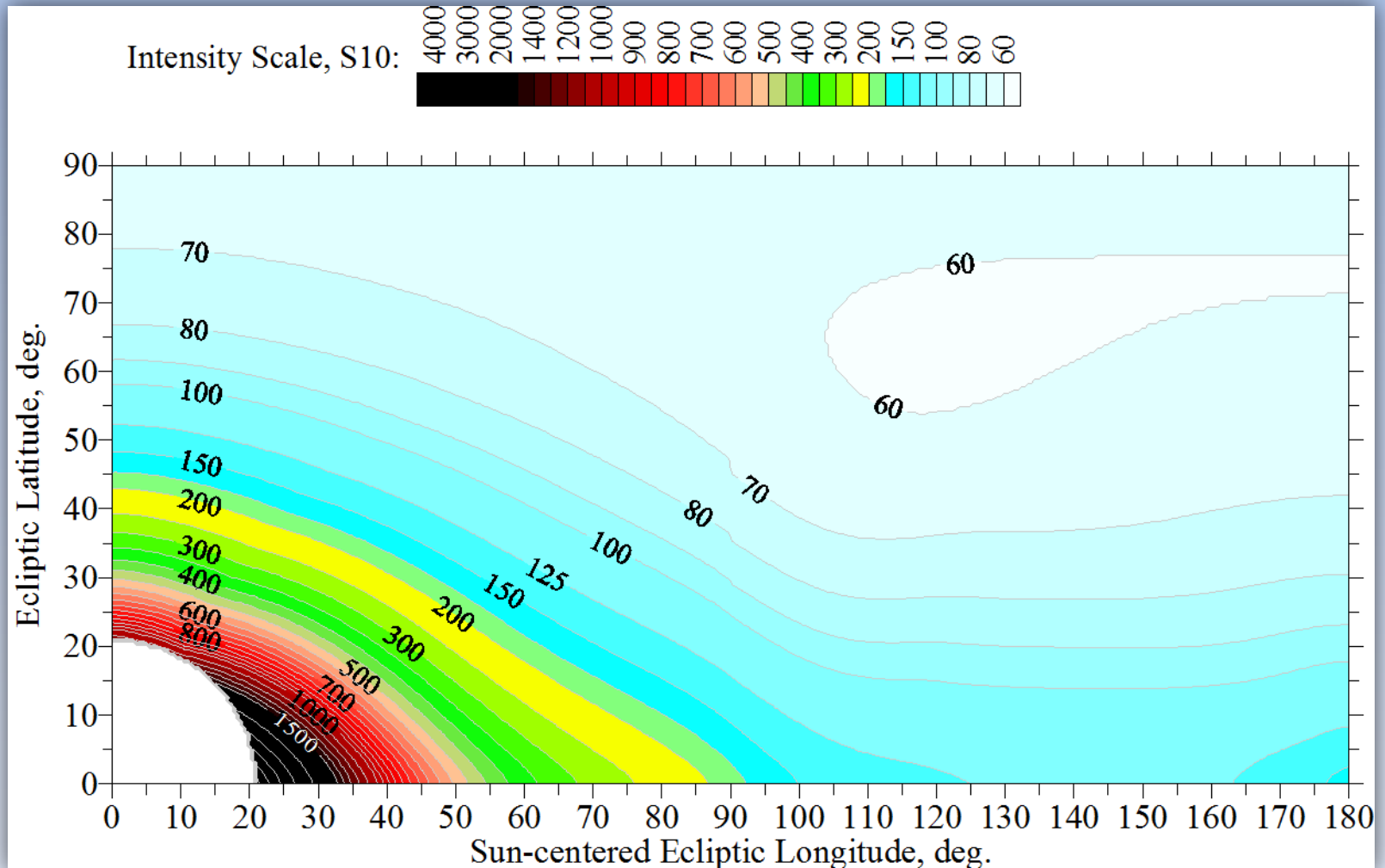
- Pył widoczny jest jako światło zodiakalne i przeciwświecenie (rozpraszanie światła słonecznego) oraz w podczerwieni (emisja termiczna).



Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

pył międzyplanetarny

- Pył widoczny jest jako światło zodiakalne i przeciwświecenie (rozpraszanie światła słonecznego) oraz w podczerwieni (emisja termiczna).



Jasność światła zodiakalnego (model)

Małe ciała, pierścienie, pył i gaz



PHIL HART
SHOOTING STARS

Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

meteoroidy

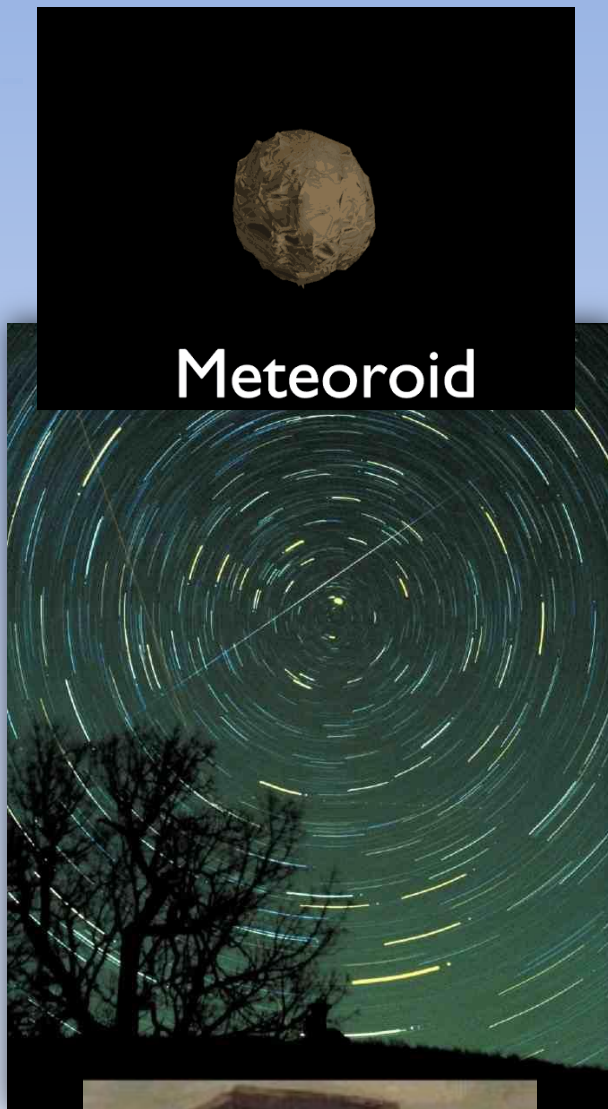
Meteoroidy to drobne ciała stałe poruszające się w przestrzeni międzyplanetarnej. Ich rozmiary zawierają się w przedziale około 0.1 mm – 10 m. Najmniejsze meteoroidy to tzw. mikrometeoroidy.

Z meteoroidami związane są dwa pojęcia o podobnych nazwach:

- **meteoryt** to meteoroid po upadku na powierzchnię innego ciała
- **meteor** to zjawisko świetlne wywołane przelotem meteoroidu przez atmosferę; bardzo jasny meteor (ponad -4 mag.) nazywany jest bolidem.

Upadki meteorytów obserwowane były od wieków. Najstarszy odnotowany pochodzi z Japonii – meteoryt Nogata (19.5.861). Jednak dopiero około 1800 r. powszechnie przyjęto „kosmiczne” pochodzenie meteorytów.

Meteoryty są samodostarczającymi się próbkami innych ciał w Układzie Słonecznym. Ich analiza dostarcza wiele cennych informacji z przeszłości i teraźniejszości układu.



Meteoroid



Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

meteoryty – klasyfikacja

Klasyfikacja meteorytów według cech fizycznych (XIX w., **nieaktualna**):

- **żelazne** – zbudowane głównie z Fe z dodatkiem Ni i inny pierwiastków siderofilnych
- **skalne** – mała zawartość pierwiastków metalicznych (Fe, Ni)
- **skalno-żelazne** – zawierające porównywalne ilości składników metalicznych i skalnych

Najłatwiej odnajdywane są meteoryty żelazne – odróżniają się wyglądem od typowych skał ziemskich, w przeciwieństwie do meteorytów skalnych. Meteoryty znalezione na Ziemi pochodzą głównie z wewnętrznej części Układu Słonecznego.



meteoryt żelazny i skalno-żelazny



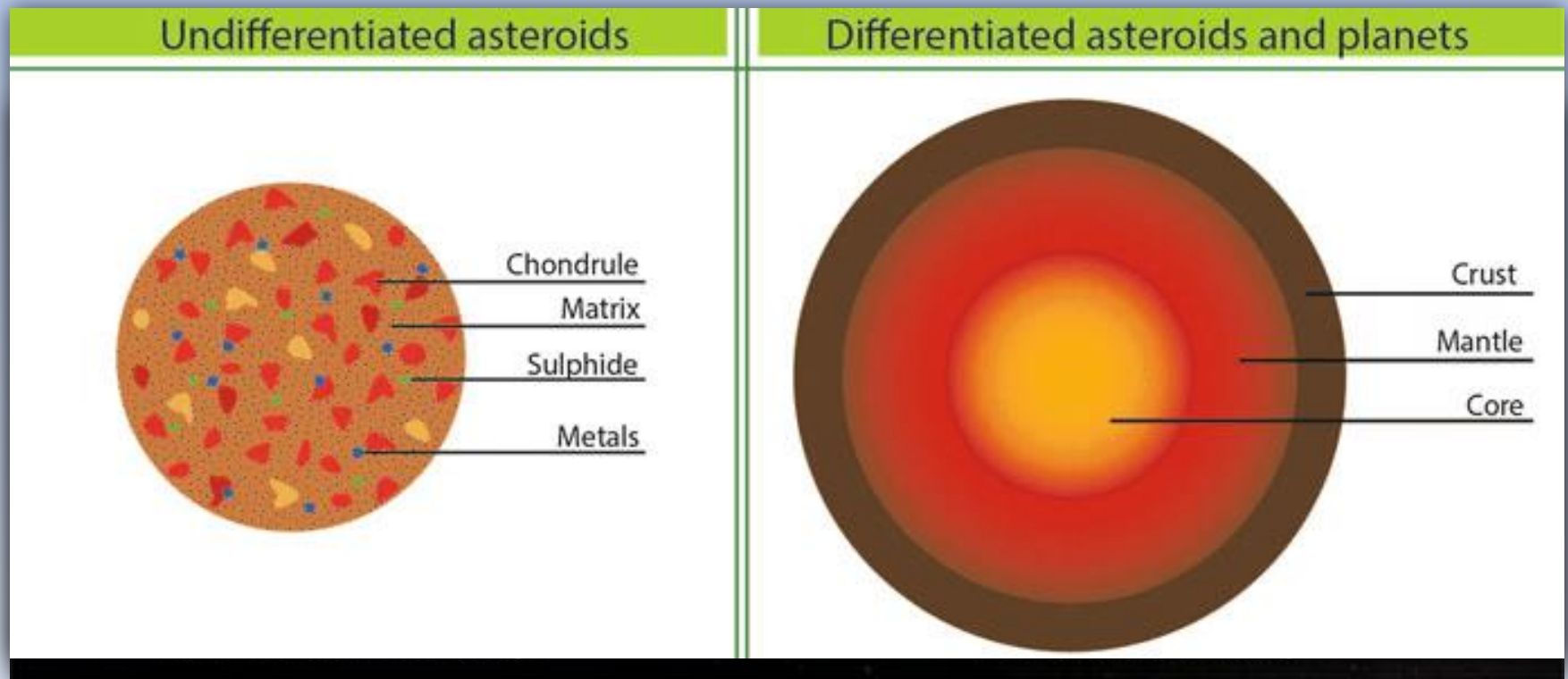
meteoryt skalny

Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

meteoryty – klasyfikacja

Współczesna klasyfikacja meteorytów opiera się na ich pochodzeniu (cechy obiektu macierzystego):

- *meteoryty pierwotne (prymitywne)* – obiekt macierzysty niezdyferencjonowany
- *meteoryty zróżnicowane* – obiekt macierzysty zdyferencjonowany



Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

meteoryty – klasyfikacja

- *meteoryty pierwotne (prymitywne)* – obiekt macierzysty niezdyferencjonowany

chondryty

- nie przeszły topienia, ale mogły ulec innym zmianom (metamorfizm termiczny, fale uderzeniowe, brekcja, reakcje chemiczne)
- skład chemiczny podobny do Słońca z wyłączeniem H, He, itp.
- zawierają chondry – ziarna o rozmiarze mm/cm zatopione w spoiwie skalnym (matrix)



Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

meteoryty – klasyfikacja

- *meteoryty pierwotne (prymitywne)* – obiekt macierzysty niezdyferencjonowany
 - **achondryty pierwotne**
 - powstały w wyniku krystalizacji magmy o składzie chondrytowym
 - chondr prawie nie ma lub nie ma
 - klasa pośrednia między chondrytami a achondrytami



Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

meteoryty – klasyfikacja

- *meteoryty zróżnicowane* – obiekt macierzysty zdyferencjonowany
 - achondryty** – powstały w wyniku krystalizacji magmy po dyferencjacji
 - kamienne (księżycowe, planetarne, planetoidalne)
 - żelazno-kamienne
 - żelazne

Poszczególne grupy pochodzą z różnych miejsc zdyferencjonowanego ciała macierzystego (skorupa, płaszcz, jądro).

achondryty kamienny planetoidalny (skorupa Westy)



achondryt żelazno-kamienny, pallasyt



Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

meteoroidy

Przejście przez atmosferę

Zachowanie meteoroidu przy przejściu przez atmosferę zależy od jego prędkości, budowy i kąta wejścia w atmosferę.

- Mikrometeoroidy wypromieniowują ciepło zyskane przez zderzenia z cząsteczkami atmosfery; osiągają powierzchnię Ziemi; czasowo mogą pozostać zawieszane w atmosferze
- Większe meteoroidy tworzą przed sobą falę uderzeniową, która:
 - podgrzewa je do $<2000\text{ K}$; uzyskane ciepło jest za duże by je wypromieniować – zewnętrzna część meteoroidu ulega stopieniu i odpada lub odparowuje (ablacja, powstaje meteor); po zastygnięciu stopiona powierzchnia tworzy skorupę obtopieniową
 - może doprowadzić do rozpadu meteoroidu, jeśli wzrost ciśnienia na fali przekracza wytrzymałość materiału

meteoryt ze skorupą obtopieniową



meteoryt na powierzchni Marsa



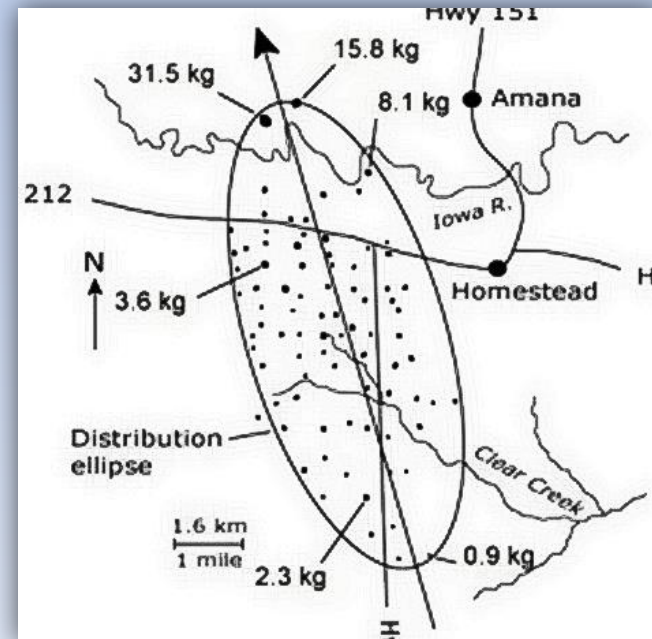
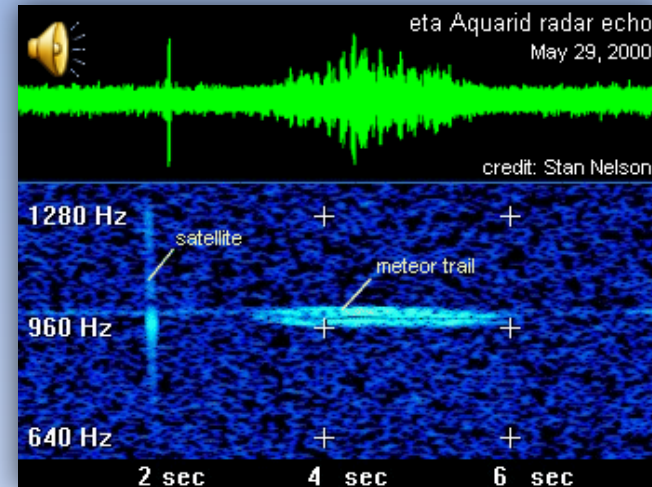
Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

meteoroidy

Przejście przez atmosferę

- meteoroidy o rozmiarze cm - 1 m – całkowita ablacja, jeśli $v > 15$ km/s lub wyhamowanie do prędkości granicznej i spadek na powierzchnię, jeśli prędkość jest mniejsza
- meteoroidy skalne 1 - 10 m – prawdopodobny rozpad i spadek fragmentów z prędkością graniczną
- meteoroidy/planetoidy skalne 10 - 100 m – prawdopodobne gwałtowne rozerwanie przez duży skok ciśnienia na fali uderzeniowej po wejściu w gęstsze warstwy atmosfery (Tunguska, Czelabińsk)
- planetoidy skalne > 100 m – mogą osiągnąć powierzchnię bez znacznej utraty prędkości i utworzyć krater
- meteoroidy/planetoidy żelazne są bardziej zwarte niż skalne, łatwiej docierają do powierzchni bez rozpadu i z większą prędkością
- przy małym kącie wejścia w atmosferę meteoroid może zostać odbity w przestrzeń

echo radarowe meteorytu



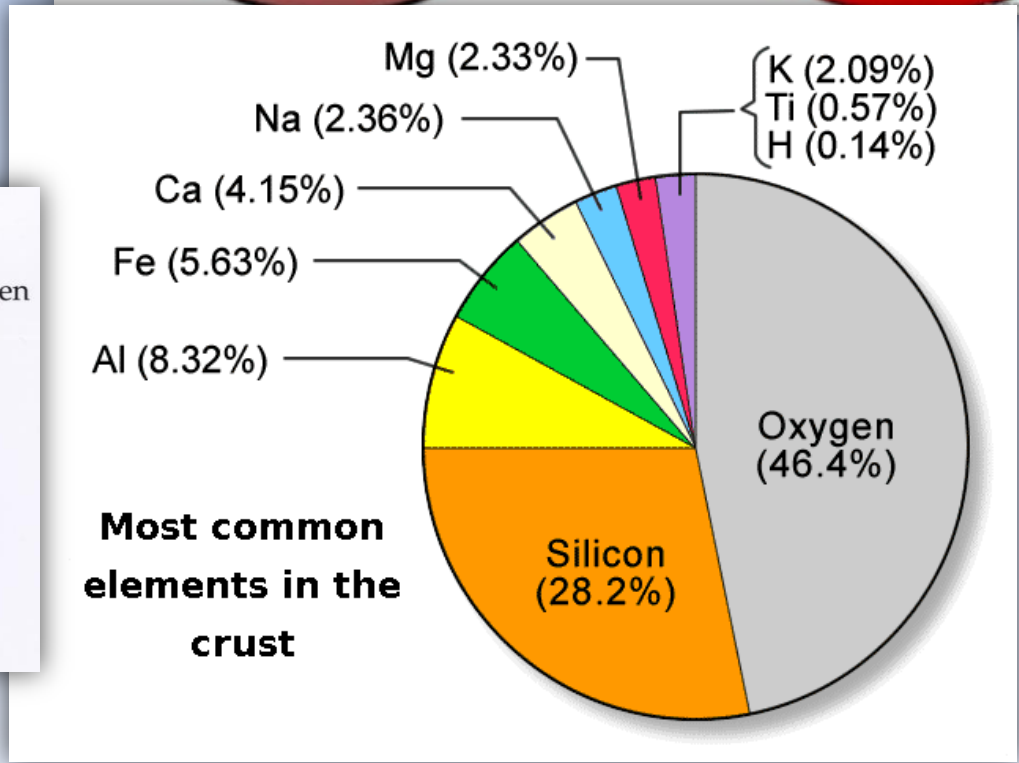
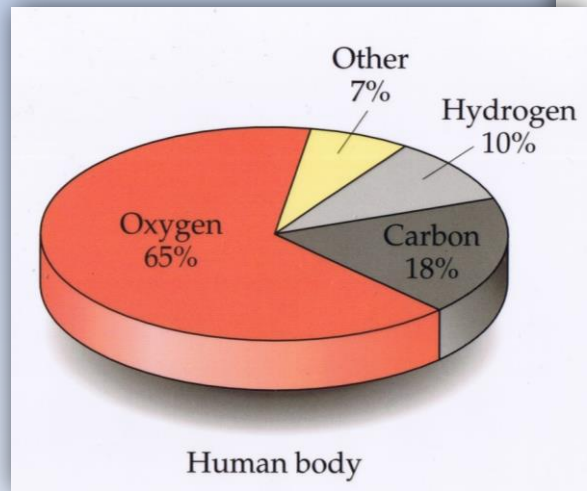
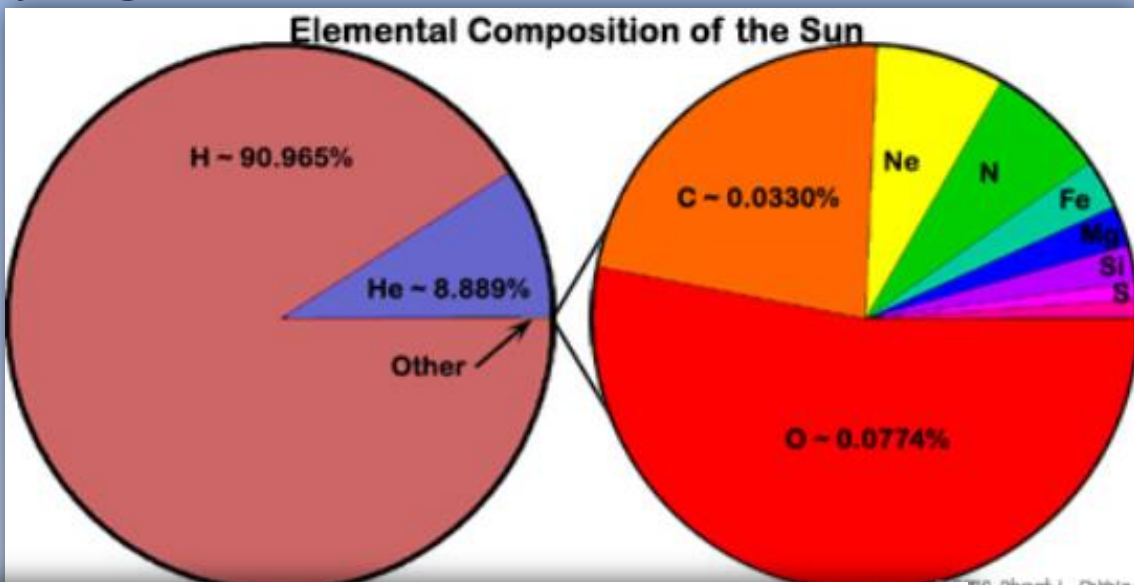
Pole spadku (elipsa rozrzutu) meteorytu Homestead (Iowa, USA, 12.02.1875)

Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

Meteoroidy – określanie słonecznego składu chemicznego

Skład chemiczny skorupy nie odzwierciedla słonecznej obfitości pierwiastków.

Obfitości te można wyznaczyć m.in. z badań Słońca i meteorytów.



Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

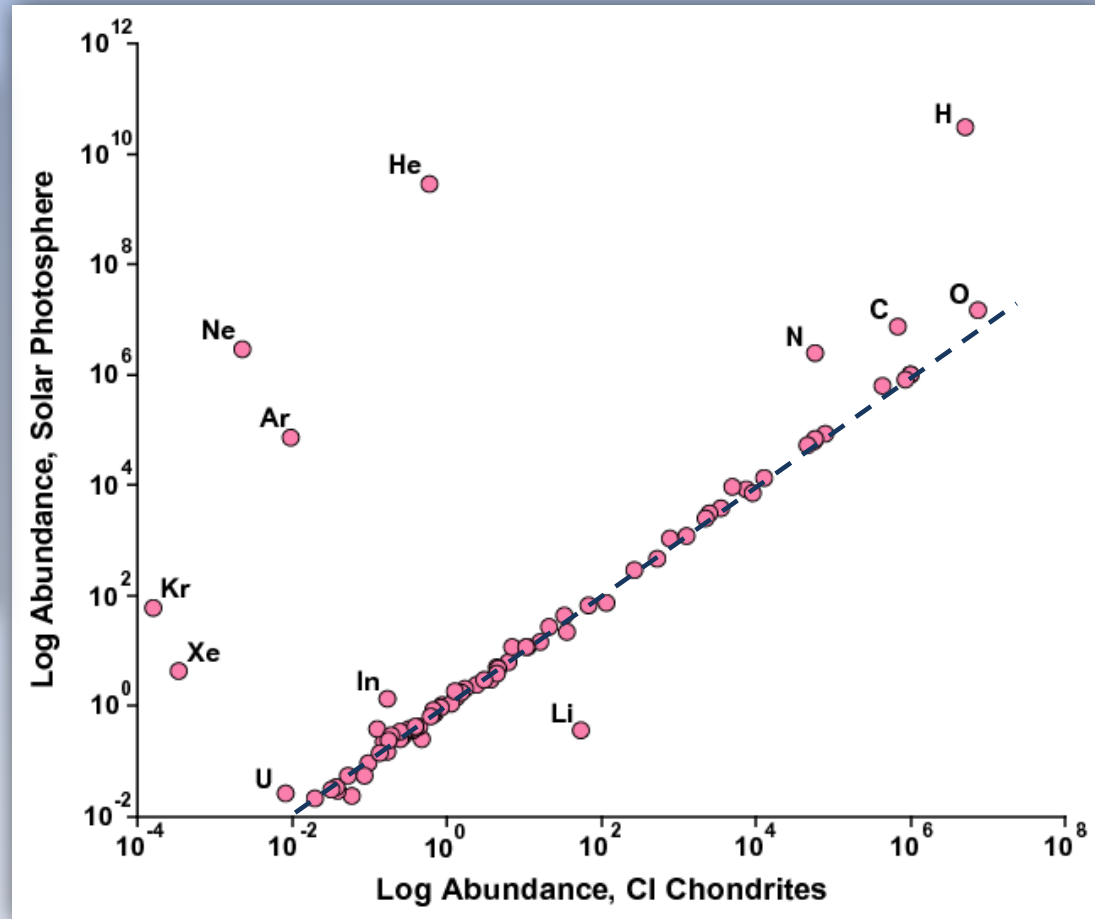
Meteoroidy – określanie słonecznego składu chemicznego

- Meteoryty są łatwo dostępnym źródłem najstarszego i najbardziej pierwotnego materiału skalnego dostępnego do badań.
- Skład chemiczny materii dysku protoplanetarnego najlepiej zachowany jest w chondrytach, a szczególnie w **chondrytach węglistych grupy CI** (bardzo mało okazów).
- Uwaga – pierwiastki lotne w ilościach obniżonych (H, He, Ne, O, C, N)



Ivuna

*Lodders 2003
Palme i Jones 2003
Asplund i in. 2009*



Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

Meteoryty - wiek

Wiek meteorytów uzyskiwany jest z datowania izotopowego (radiometrycznego). Badanie różnych izotopów promieniotwórczych dostarcza kilka różnych informacji czasowych:

- *czas powstania* (wiek meteorytu) – czas, który upłynął od powstania meteoroidu (zestalenia z fazy gazowej lub ciekłej); najstarsze meteoryty mają 4.56 mld lat (wiek Układu Słonecznego)
- *czas ekspozycji na promieniowanie kosmiczne* – czas wskazujący jak długo meteoroid istniał jako samodzielne ciało lub na powierzchni większego obiektu (w zasięgu CR); zawiera się w $10^5 - 10^9$ lat
- *czas ziemski* – czas jaki upłynął od upadku na Ziemię; mierzony z radioizotopów tworzonych przez CR i wietrzenia; zwykle $10^4 - 10^5$ lat (rzadko 10^6 lat)

chondryt węglisty Northwest Africa 2364,
wiek 4.568 mld lat
jeden z najstarszych znanych meteorytów

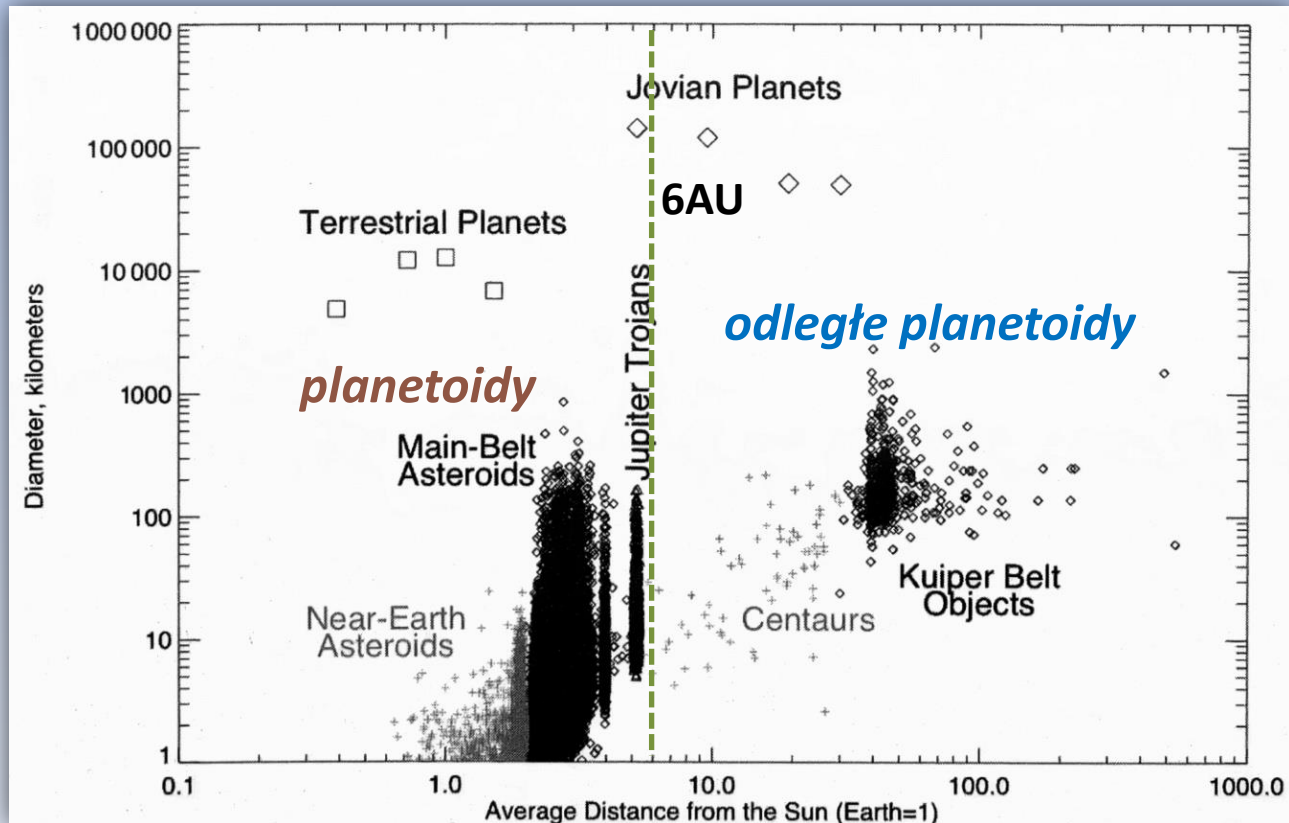


Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

planetoidy

Małe ciała Układu Słonecznego o rozmiarze od ≈ 10 m do kilkuset km to tzw. planetoidy (minor planets). Główna klasyfikacja planetoid oparta jest na cechach ich orbit:

- *bliskie planetoidy (asteroids)* – zajmują wewnętrzną część Układu Słonecznego do orbity Jowisza
- *odległe planetoidy (distant minor planet)* – orbity położone poza orbitą Jowisza

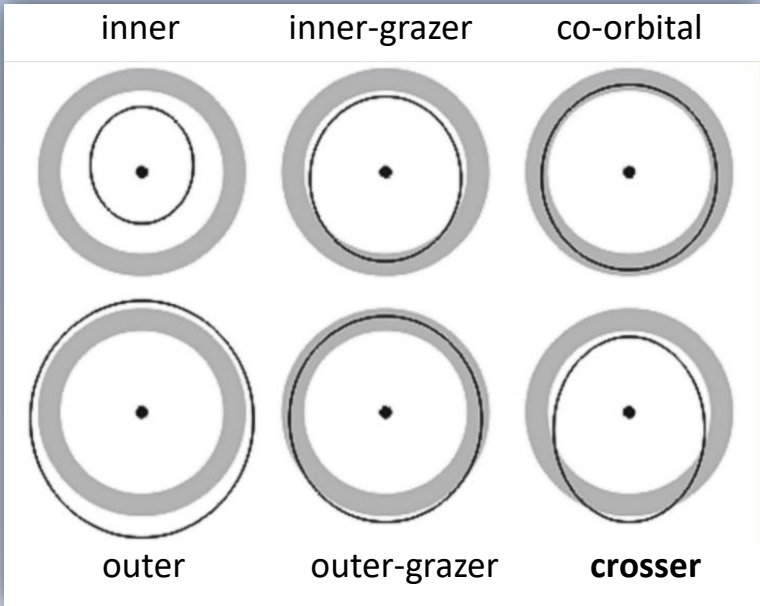
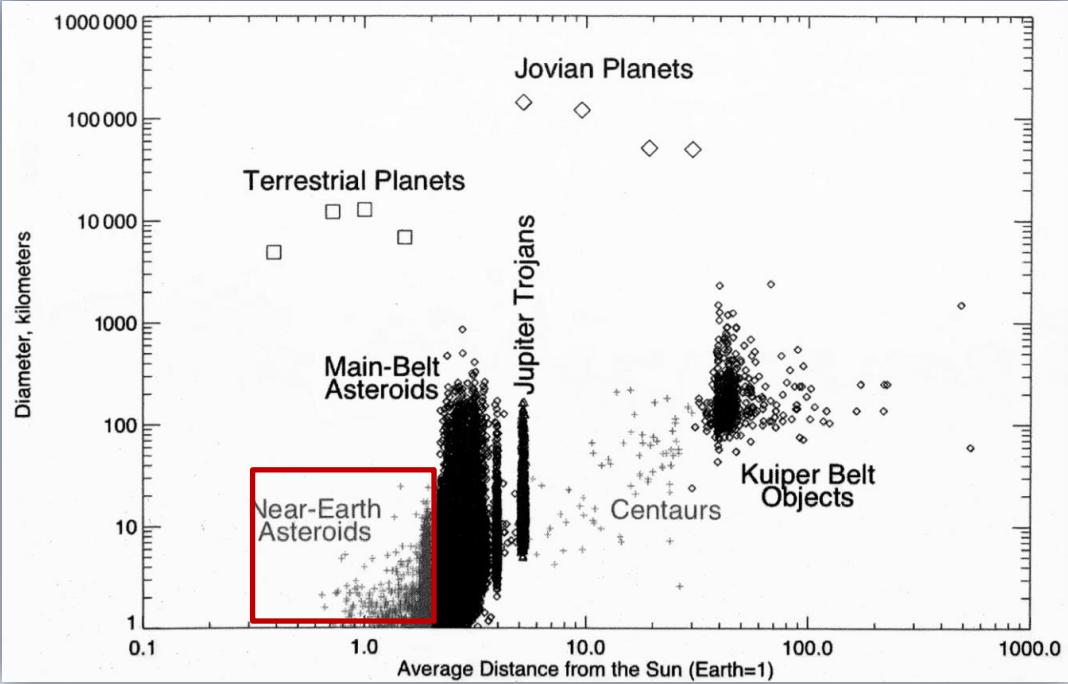


Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

bliskie planetoidy

MBA - Main Belt Asteroids

- *planetoidy bliskie Ziemi* (NEA - Near-Earth Asteroids) – planetoidy o peryheliach <1.3 AU; orbity niestabilne (stabilność <10 mln lat); obszar źródłowy: MBA; znanych obiektów: >21 000; rozmiary do kilkunastu km; gęstości: 1 - 3 g/cm³ (porowate/zwarte); wyróżniane grupy: Ateny, Apolla, Amora
- *planetoidy przecinające orbity planet wewnętrznych* (inner-planet crossers) – szerzej ujęta grupa planetoid, których orbity leżą w obszarze planet wewnętrznych (np. Mars crossers)
- *planetoidy trojańskie planet wewnętrznych* – planetoid poruszające się w pobliżu punktów L₄ i L₅ układu Słońce - planeta wewnętrzna (Wenus - 1, Ziemia - 2, Mars - 14)
- *wulkanoidy* (vulcanoids) – hipotetyczne planetoidy krążące wewnątrz orbity Merkurego

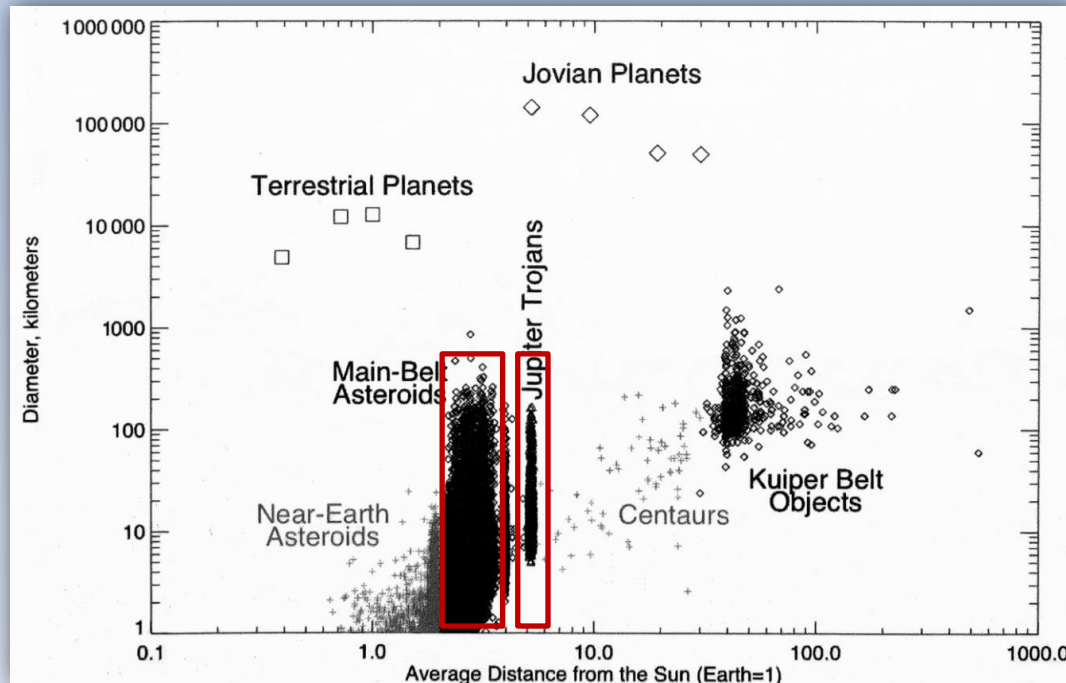


typy orbit planetoid (czarna linia, szary pas to obszar orbity planety (perihelium - aphelium))

Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

bliskie planetoidy

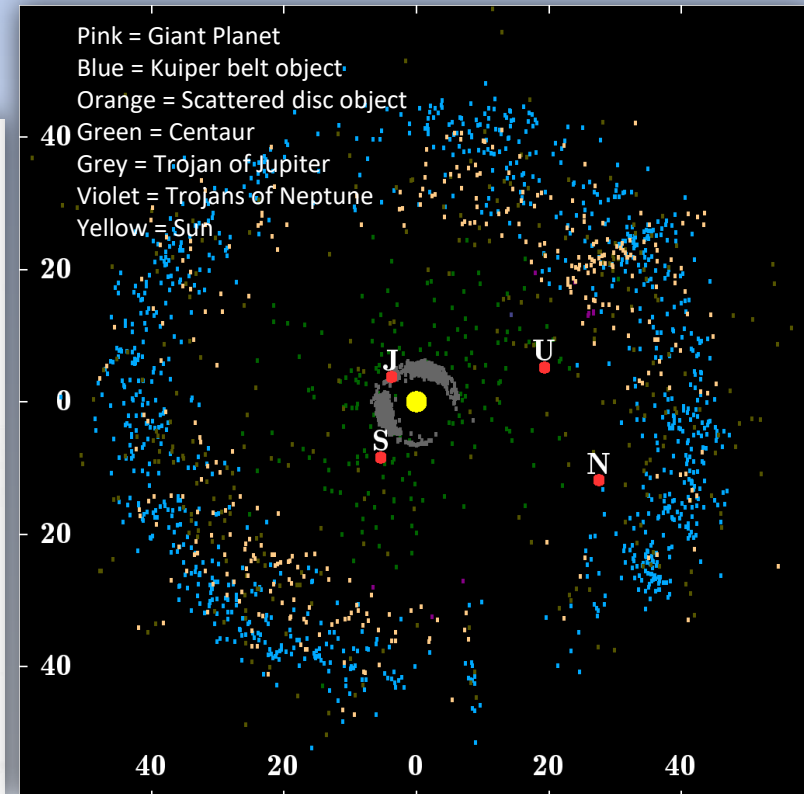
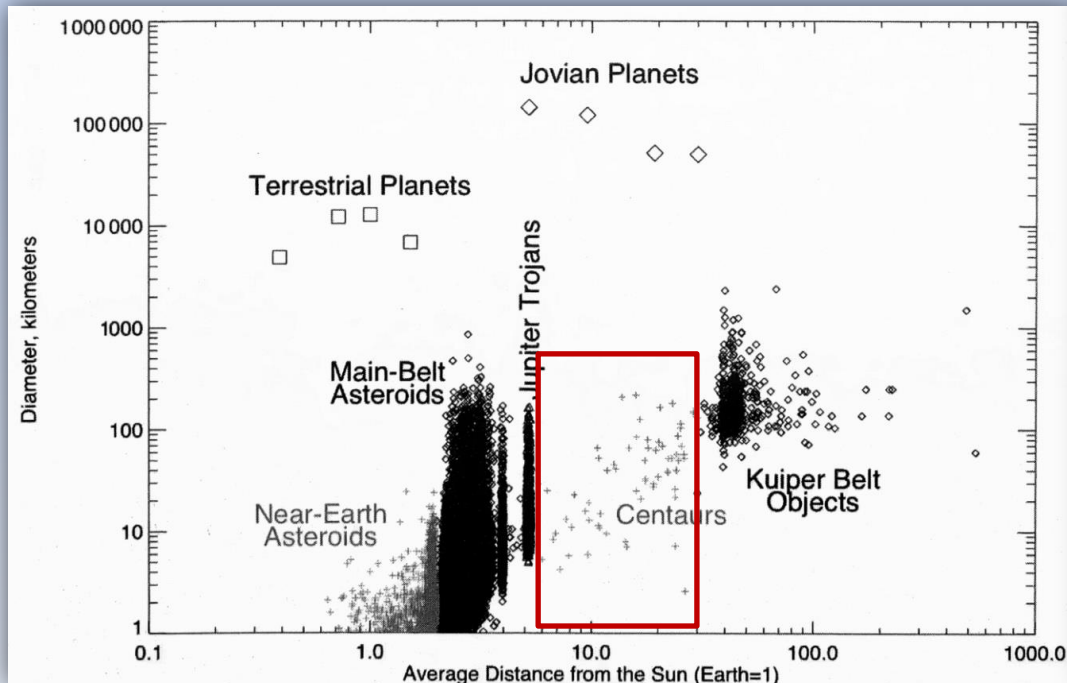
- *główny pas planetoid (MBA - Main Belt Asteroids)* – planetoidy krążące po małych eliptycznych, w większości stabilnych orbitach w odległości 2.1 - 3.3 AU; oczekiwana liczba obiektów: >1 mln (>1 km); rozmiary do ponad 200 km; gęstości: 1 - 3 g/cm³ (obiekty zawierające lód, skałę i metal, porowate/zwarte); całkowita masa $\approx 5 \times 10^{-4} M_Z$
- *planetoidy trojańskie Jowisza* – dwie grupy planetoid poruszających się w pobliżu punktów L₄ i L₅ układu Jowisz - Słońce; znanych obiektów: > 11000 (całkowita liczebność może > 1 mln); rozmiary do około 100 km; gęstości: 1 - 2 g/cm³



Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

odległe planetoidy

- *centaury* – planetoidy, których orbity leżą pomiędzy Jowiszem a Neptunem; orbity stabilne nie dłużej niż 10^6 - 10^8 lat; oczekiwana liczba obiektów: kilkadziesiąt tysięcy (>1 km); rozmiary do ponad 200 km;
- *planetoidy trojańskie Neptuna (Urana)* – planetoid poruszających się w pobliżu punktów L_4 i L_5 układu Słońce - Neptun (Uran); znanych obiektów: Neptun - 28, Uran - 2

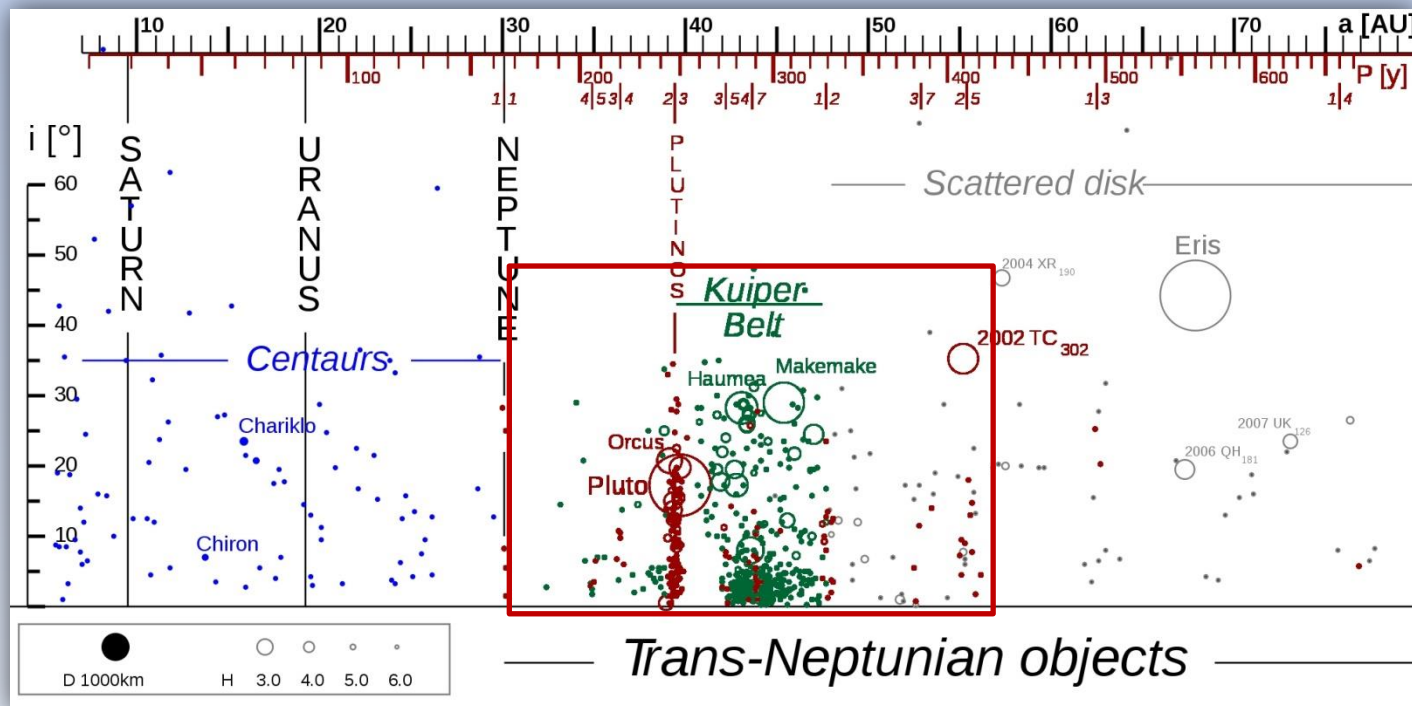


Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

odległe planetoidy

obiekty transneptunowe (TNO - Trans-Neptunian objects)

- *obiekty pasa Kuipera* (KBO - Kuiper Belt Objects) – obiekty położone w odległościach od 30 do 55 AU; rozmiary przekraczają 1000 km; gęstość do 2 g/cm^3 ; orbity o niedużym mimośrodku (<0.4); całkowita masa może sięgać $10^{-2} M_Z$; wyróżnia się dwie podgrupy:
 - klasyczne KBO (Cubewanos) – mimośród poniżej 0.2; nie pozostają w rezonansie z Neptunem
 - rezonancyjne KBO – nieco większe mimośrodky; rezonans orbitalny z Neptunem, np.: 3:2 - Plutonki

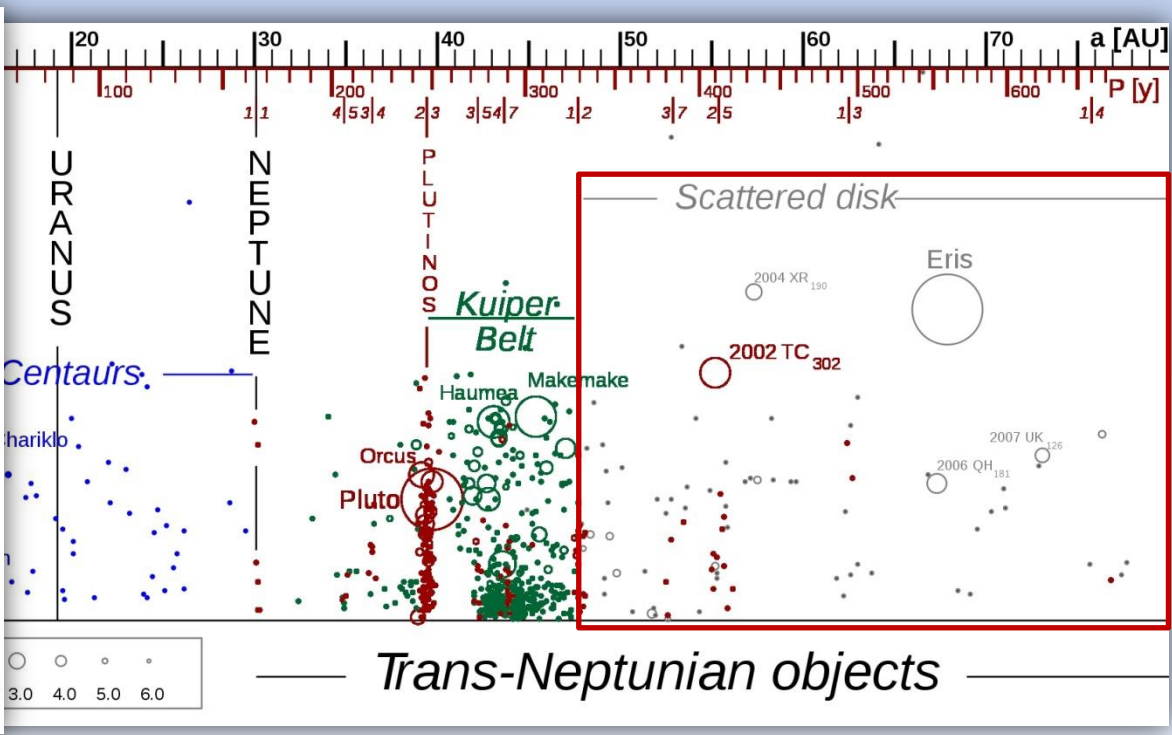
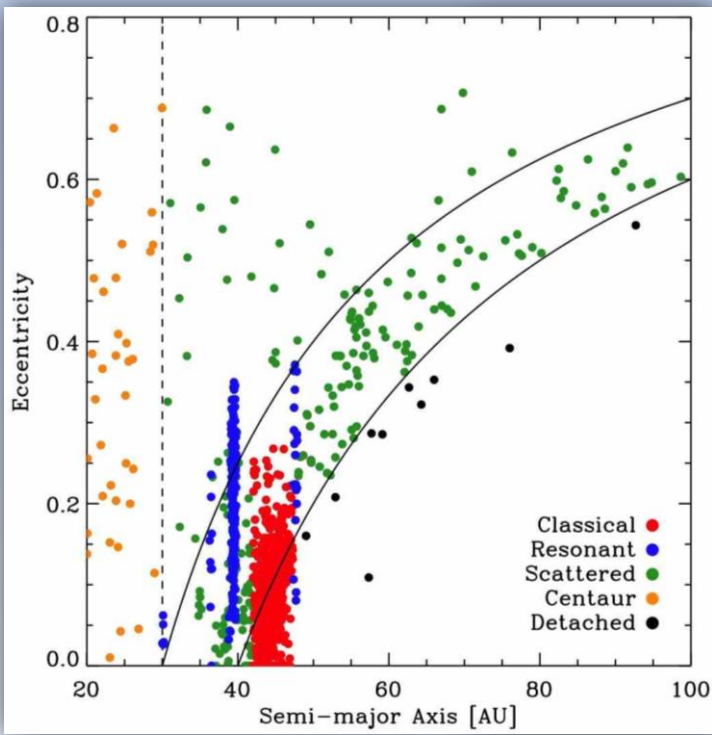


Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

odległe planetoidy

obiekty transneptunowe (TNO - Trans-Neptunian objects)

- **obiekty dysku rozproszonego (SDO - scattered disk objects)** – obiekty poruszające się po orbitach o mimośrodkach sięgających 0.8 i mocno nachylonych; peryhelia powyżej 30 AU (do 40 AU); brak rezonansu z Neptunem, ale istotne oddziaływanie grawitacyjne od tej planety (przyczyna dużego e ?); obiekty skalno-lodowe; całkowita masa może przekraczać $10^{-1} M_Z$
- **dalekie obiekty odłączone (DDO - distant detached objects)** – orbity silnie spłaszczone, podobnie jak SDO, ale peryhelia powyżej 40 AU co praktycznie wyklucza grawitacyjne oddziaływanie Neptuna (skąd duże e ?)

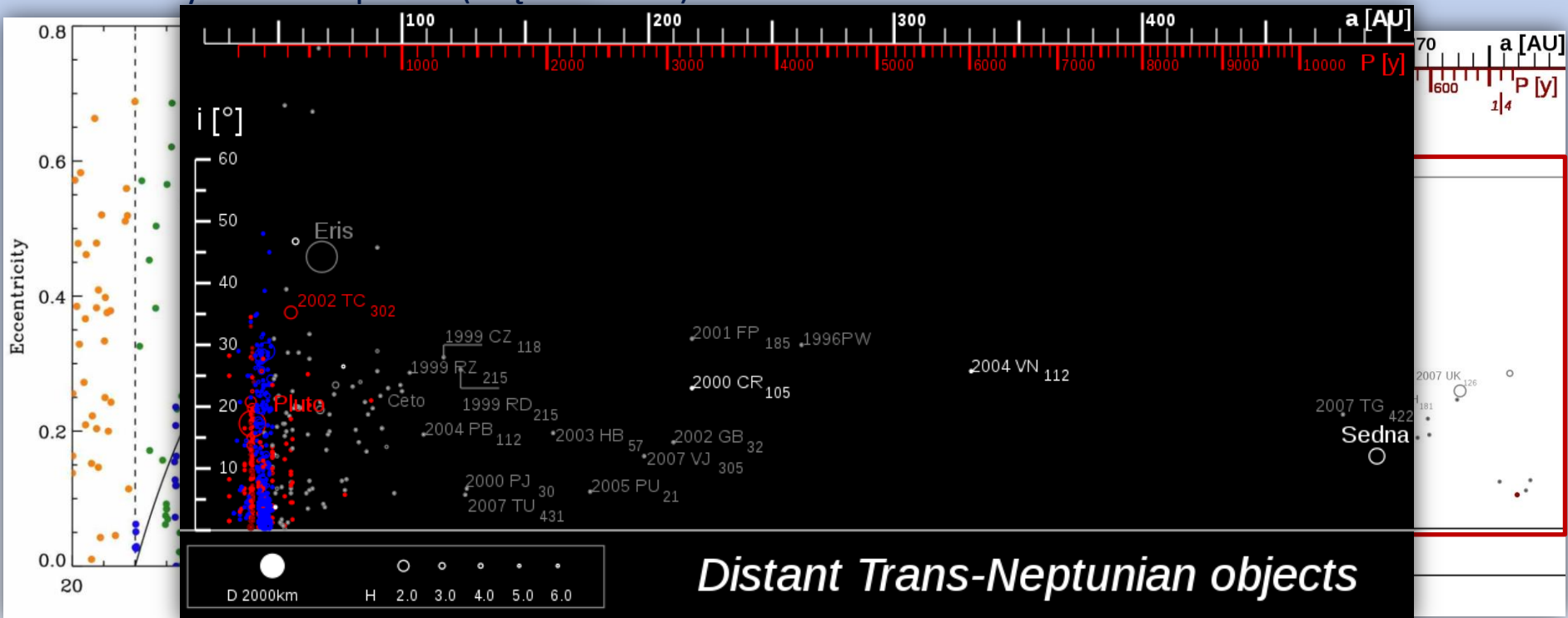


Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

odległe planetoidy

obiekty transneptunowe (TNO - Trans-Neptunian objects)

- *obiekty dysku rozproszonego (SDO - scattered disk objects)* – obiekty poruszające się po orbitach o mimośrodkach sięgających 0.8 i mocno nachylonych; peryhelia powyżej 30 AU (do 40 AU); brak rezonansu z Neptunem, ale istotne oddziaływanie grawitacyjne od tej planety (przyczyna dużego e ?); obiekty skalno-lodowe; całkowita masa może przekraczać $10^{-1} M_Z$
- *dalekie obiekty odłączone (DDO - distant detached objects)* – orbity silnie spłaszczone, podobnie jak SDO, ale peryhelia powyżej 40 AU co praktycznie wyklucza grawitacyjne oddziaływanie Neptuna (skąd duże e ?)

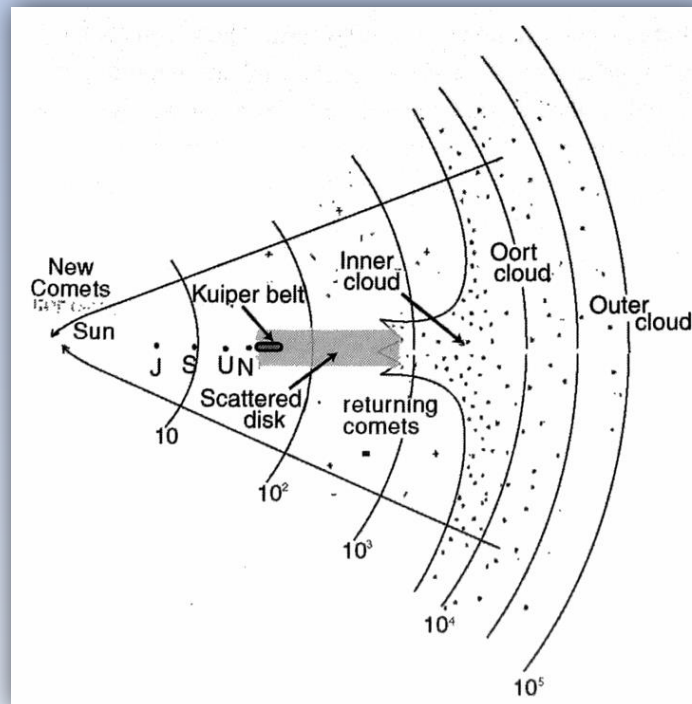


Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

odległe planetoidy

obiekty transneptunowe (TNO - Trans-Neptunian objects)

- *obiekty obłoku Oorta* (OCO – Oort cloud objects) – obserwacje komet długookresowych wskazują, że Układ Słoneczny otoczony jest sferycznym obłokiem zawierającym nawet >100 mld obiektów lodowych (jąder kometarnych); brak bezpośredniego potwierdzenia obserwacyjnego; oszacowania wskazują na istnienie dwóch części tego obłoku:
 - *obłok wewnętrzny* – pozostałość po dysku protoplanetarnym (?); odległość: $10^3 - 10^4$ AU
 - *obłok zewnętrzny (klasyczny)* – ma kształt sfery; sięga do około 50 000 AU; powstał i jest zasilany przez zaburzenia orbit obiektów dysku wewnętrznego (?)



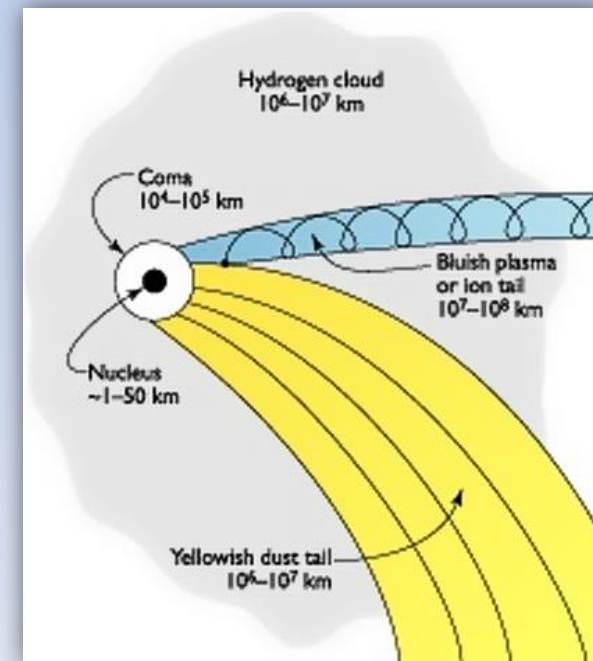
Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

komety

Komety należą do najbardziej widowiskowych obiektów astronomicznych. Zjawisko komety składa się z *głowy* (coma), *obłoku wodorowego* (hydrogen cloud), *warkocza pyłowego* (dust tail) i *warkocza plazmowego* (ion tail). Źródłem materii tworzącej zjawisko jest niewielkie *jądro lodowo-skalne* (nucleus).

Głównym źródłem komet jest obszar TNO, zatem należą do najbardziej pierwotnych obiektów w Układzie Słonecznym.

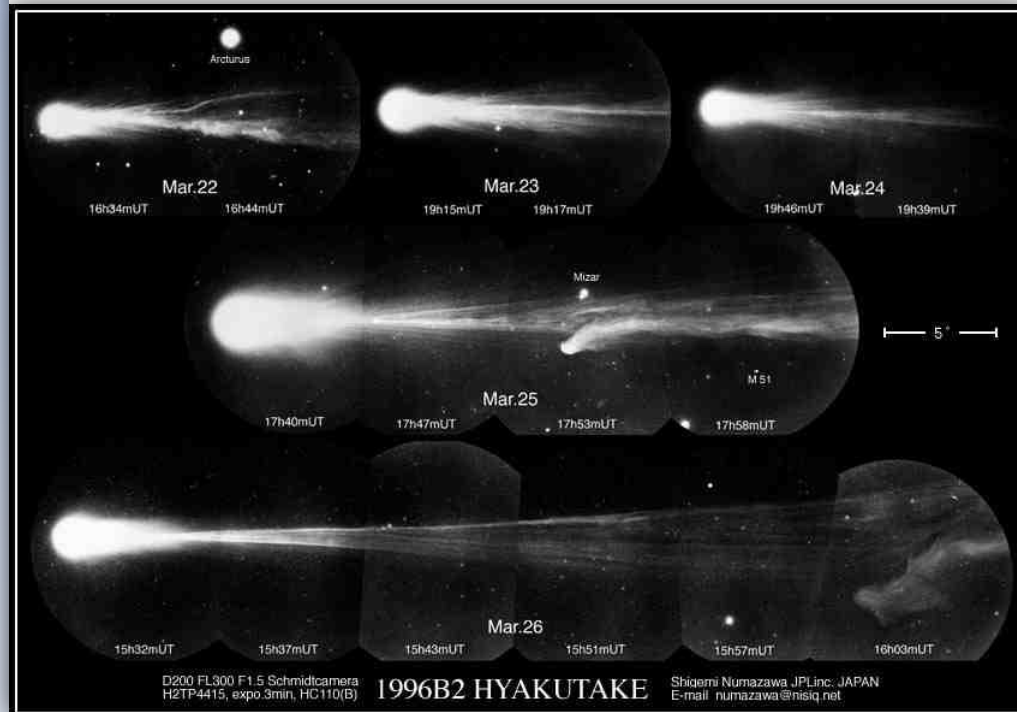
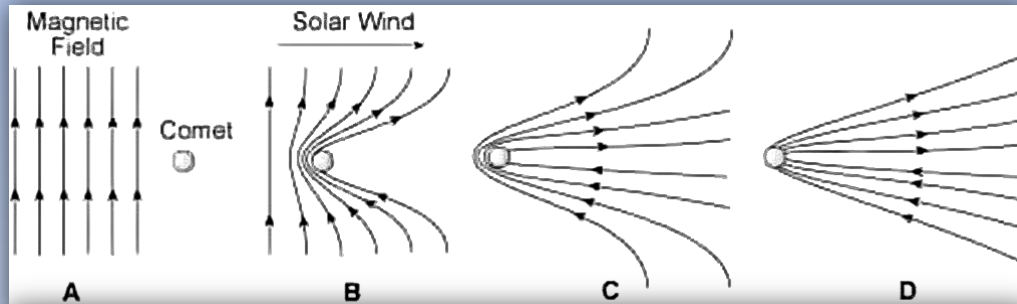
Aktywność kometarna wywoływana jest przez ogrzewanie komety przez Słońce. Dostarczona energia powoduje sublimację lodu. Sublimujący gaz pociąga za sobą pył. Aktywność pojawia się zwykle na odległości 3 AU (czasem nawet 20 AU).



Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

komety

Gaz ulatujący z jądra ulega jonizacji (fotojonizacja i wymiana ładunku) i oddziałuje z wiatrem słonecznym i IMF tworząc kometarną magnetosferę indukowaną. Przełączenia linii pola magnetycznego w ogonie prowadzi do zjawiska oderwania warkocza plazmowego.

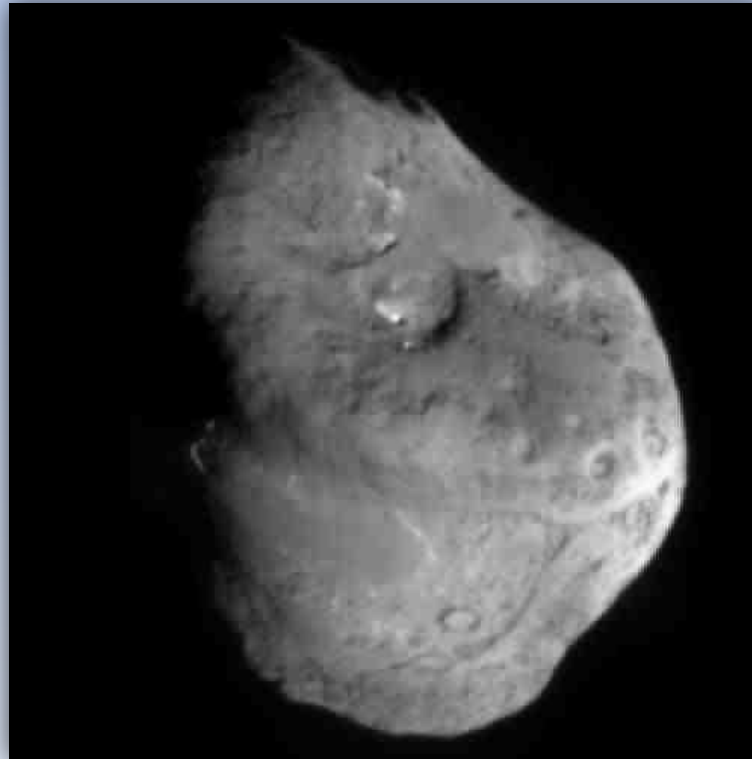


kometa Hyakutake – oderwanie warkocza plazmowego

Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

komety

Jądro kometarne ma rozmiar rzędu 1 - 10 km (mniejsze od ≈ 1 km są trudne do obserwacji). Gęstość jądra jest mniejsza niż 1 g/cm^3 . Jądro jest dość luźną „bryłą” zbudowaną głównie z materiału lodowego (lody astrofizyczne) z domieszką materiału skalnego a nawet związków organicznych. Powierzchnia jądra ma bardzo małe albedo, poniżej 0.05 („czarne jak smoła”).



Jądro komety Tempel 1