

Astrofizyka Układów Planetarnych

8

PLANETARNY DROBIAZG

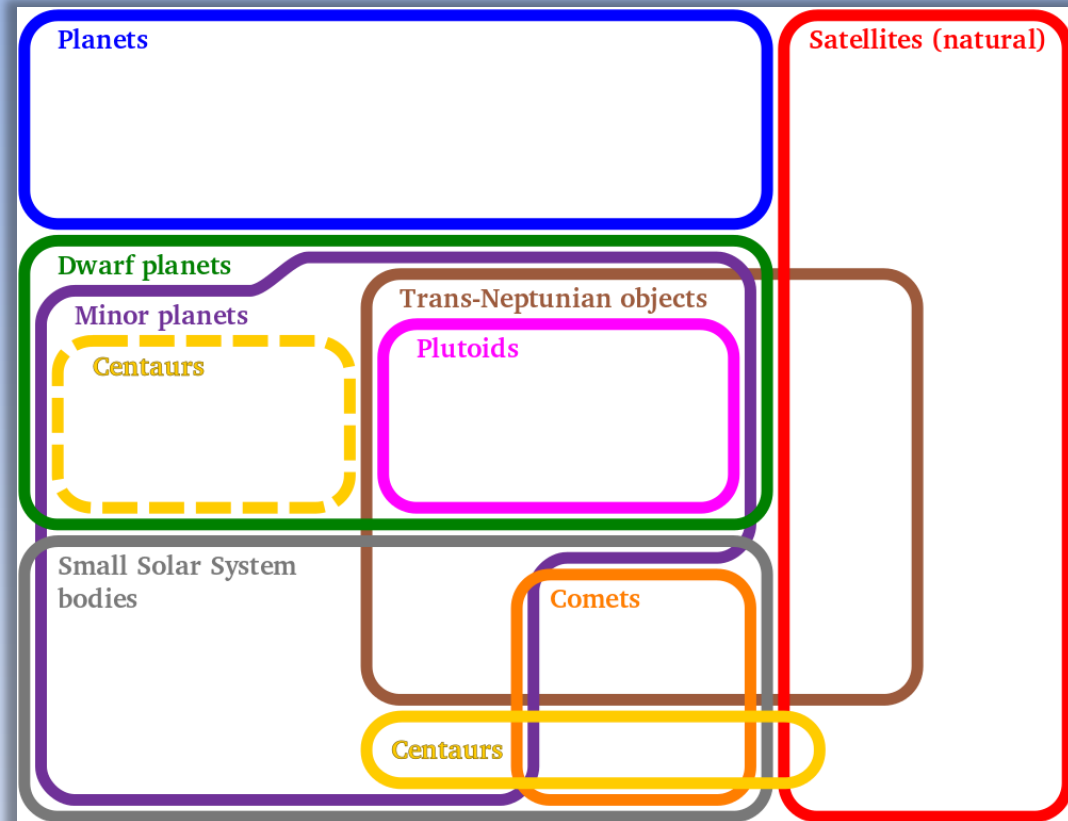


Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

Nazewnaczy mętlik

Jak nazywane są obiekty mniejsze od planety?

- planeta karłowata / planetula
- planetoida (asteroid)
- planetka (minor planet)
- 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

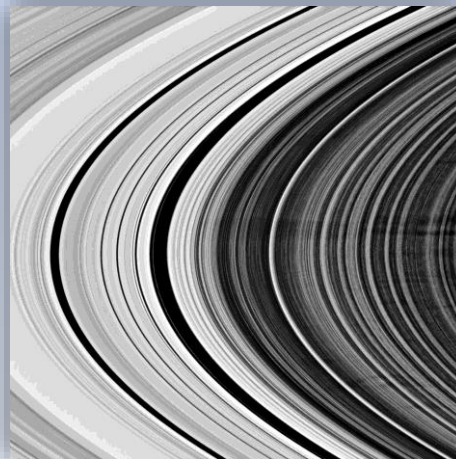
Planetarny drobiazg

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

pozostałe obiekty Układu Słonecznego:

planety, planety karłowate, księżyce (*), Słońce

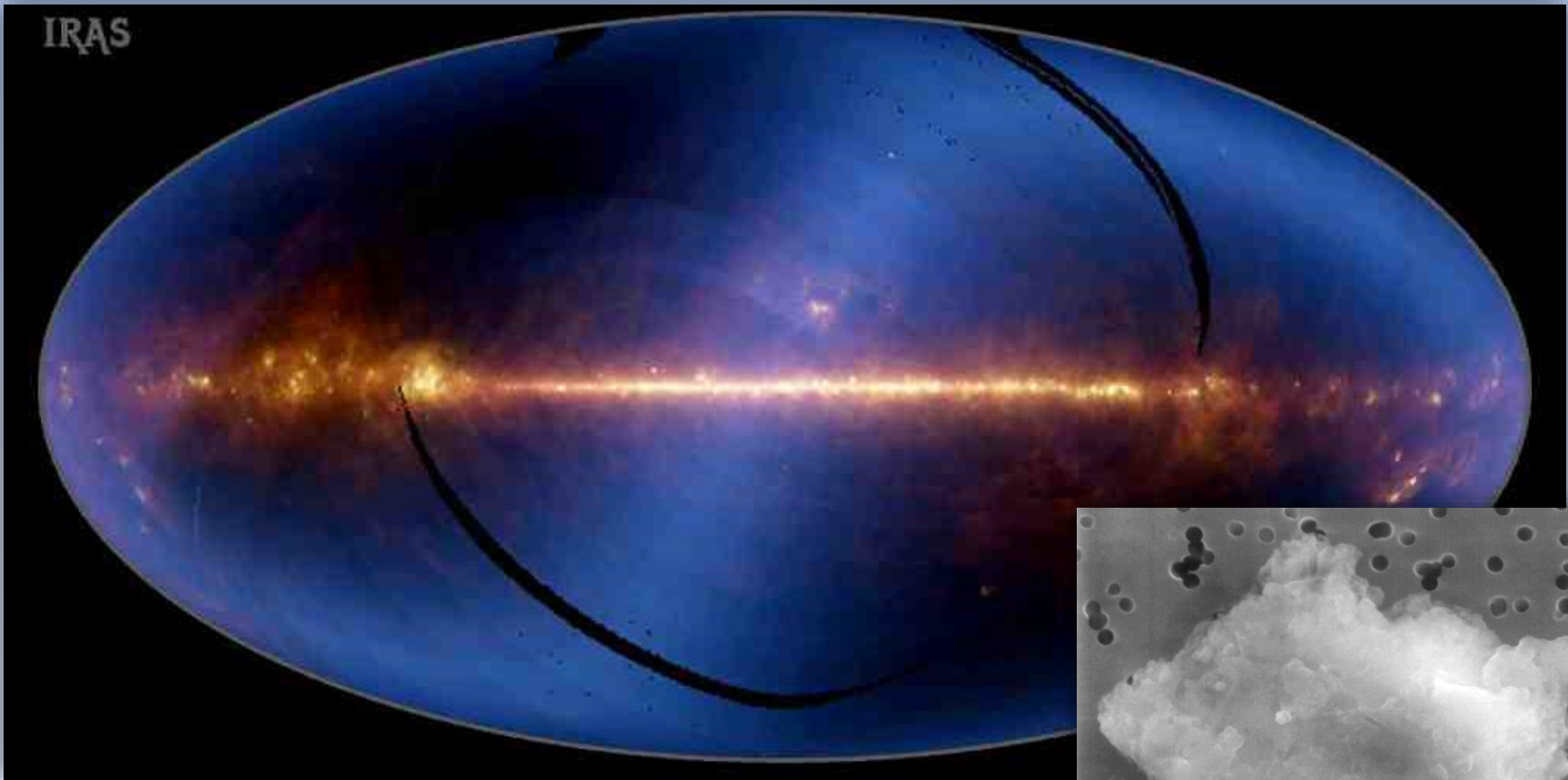
(*) małe księżyce rozmiarami i cechami pasują do małych ciał US, duże księżyce fizycznie przypominają planety (karłowate).



Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

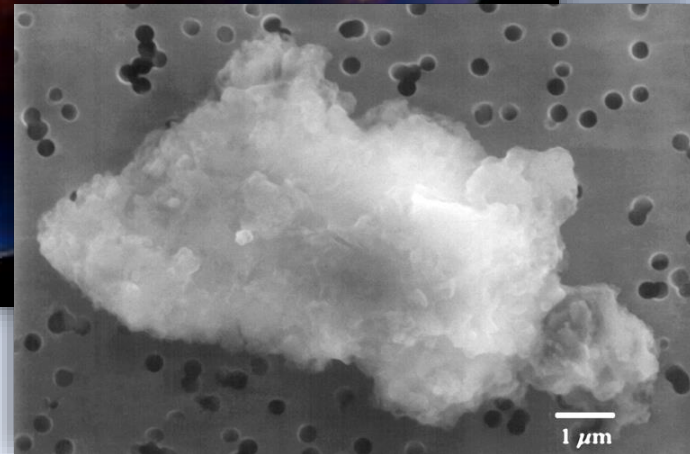
pył międzyplanetarny

- 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).

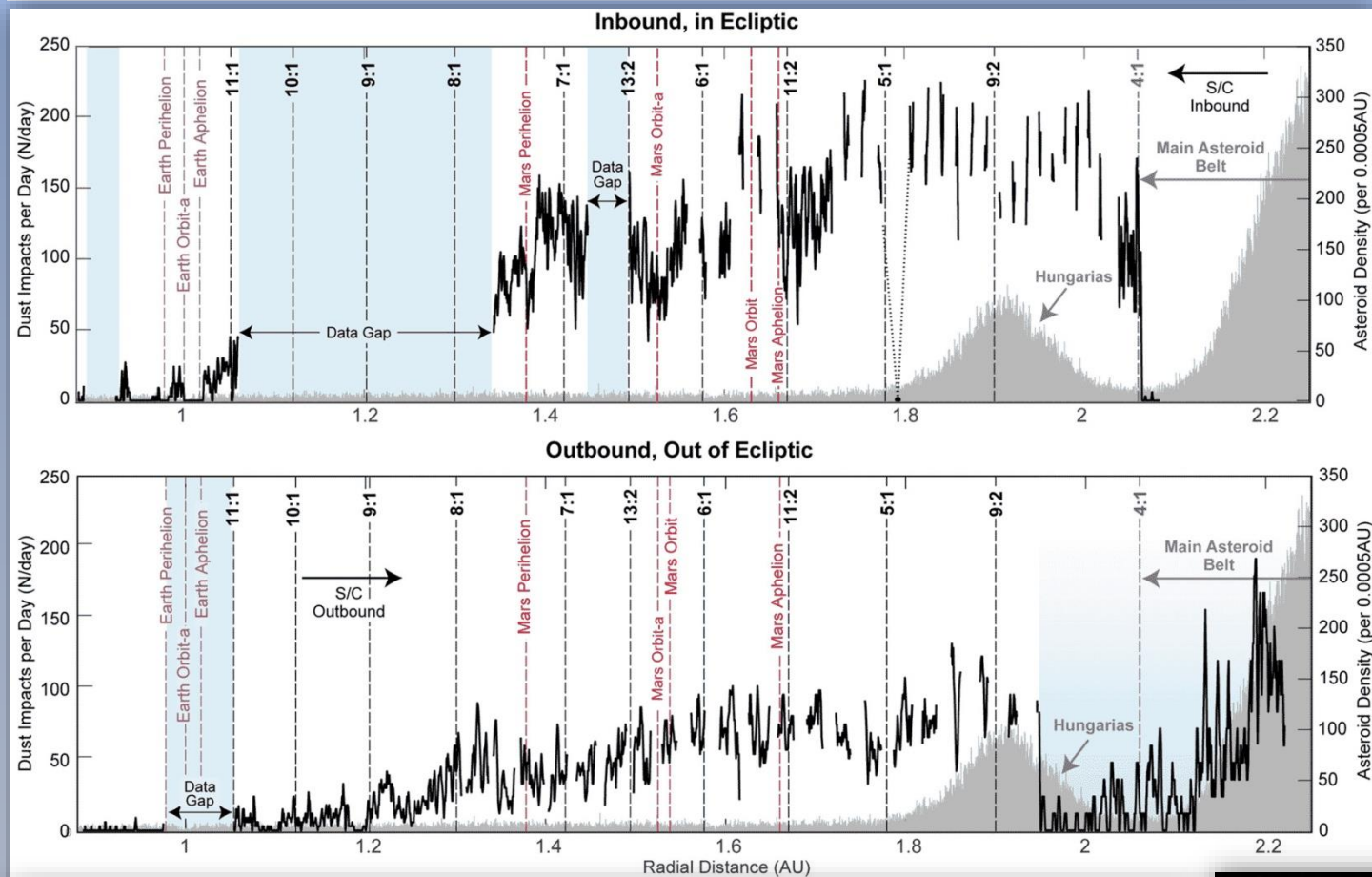


Obraz całego nieba w podczerwieni (satelita IRAS).
Widoczne rozmyte świecenie termiczne pyłu
(w kolorze niebieskim).

Ziarno pyłu w
mikroskopie
elektronowym

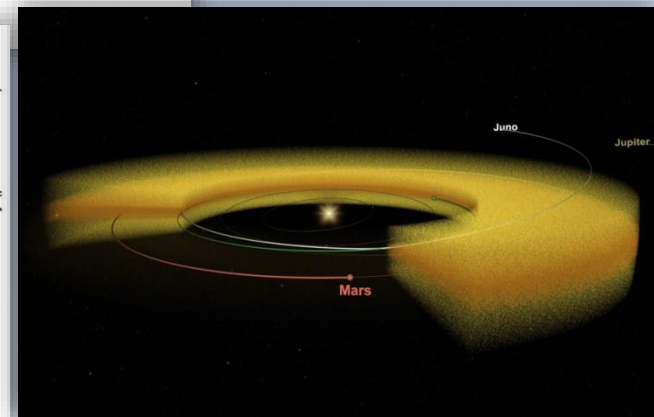
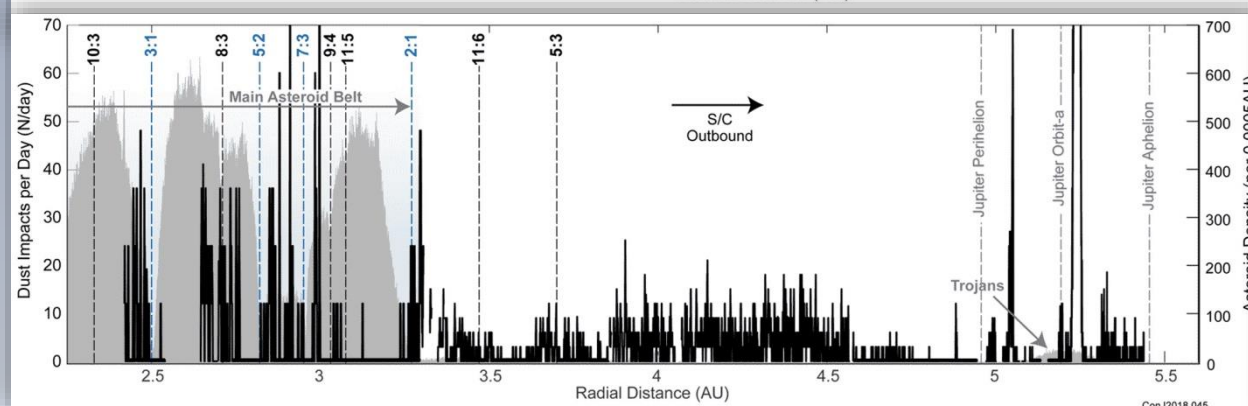


Małe ciała, pierścienie, pył i gaz



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

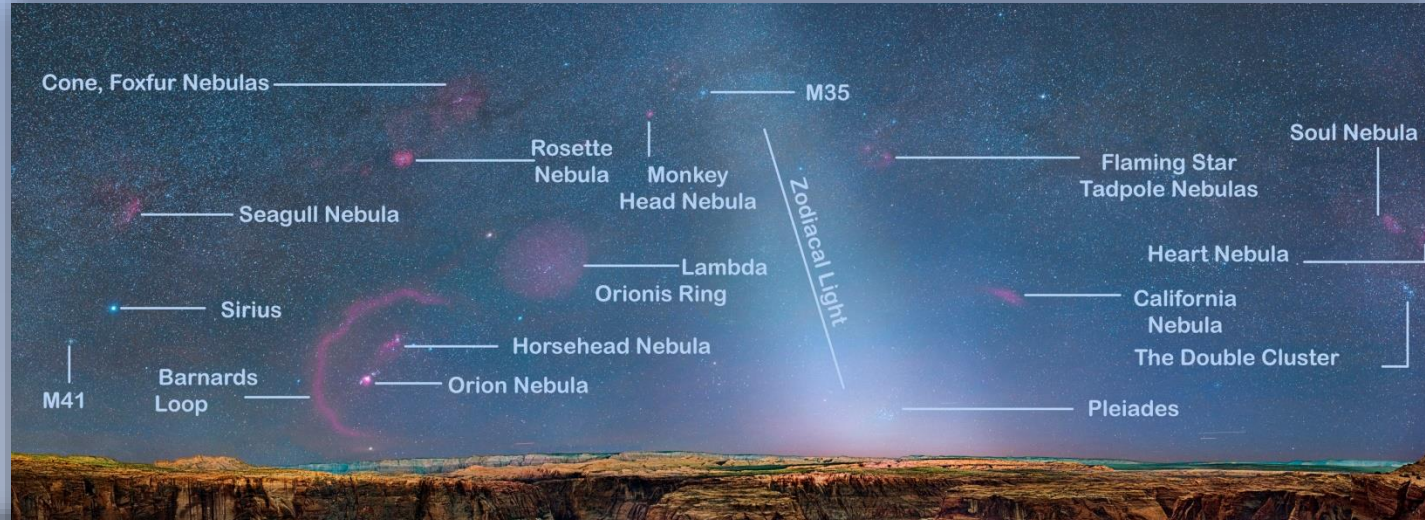
Jorgensen, J. L., i in., Journal of Geophysical Research: Planets, 2021



Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

pył międzyplanetarny

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

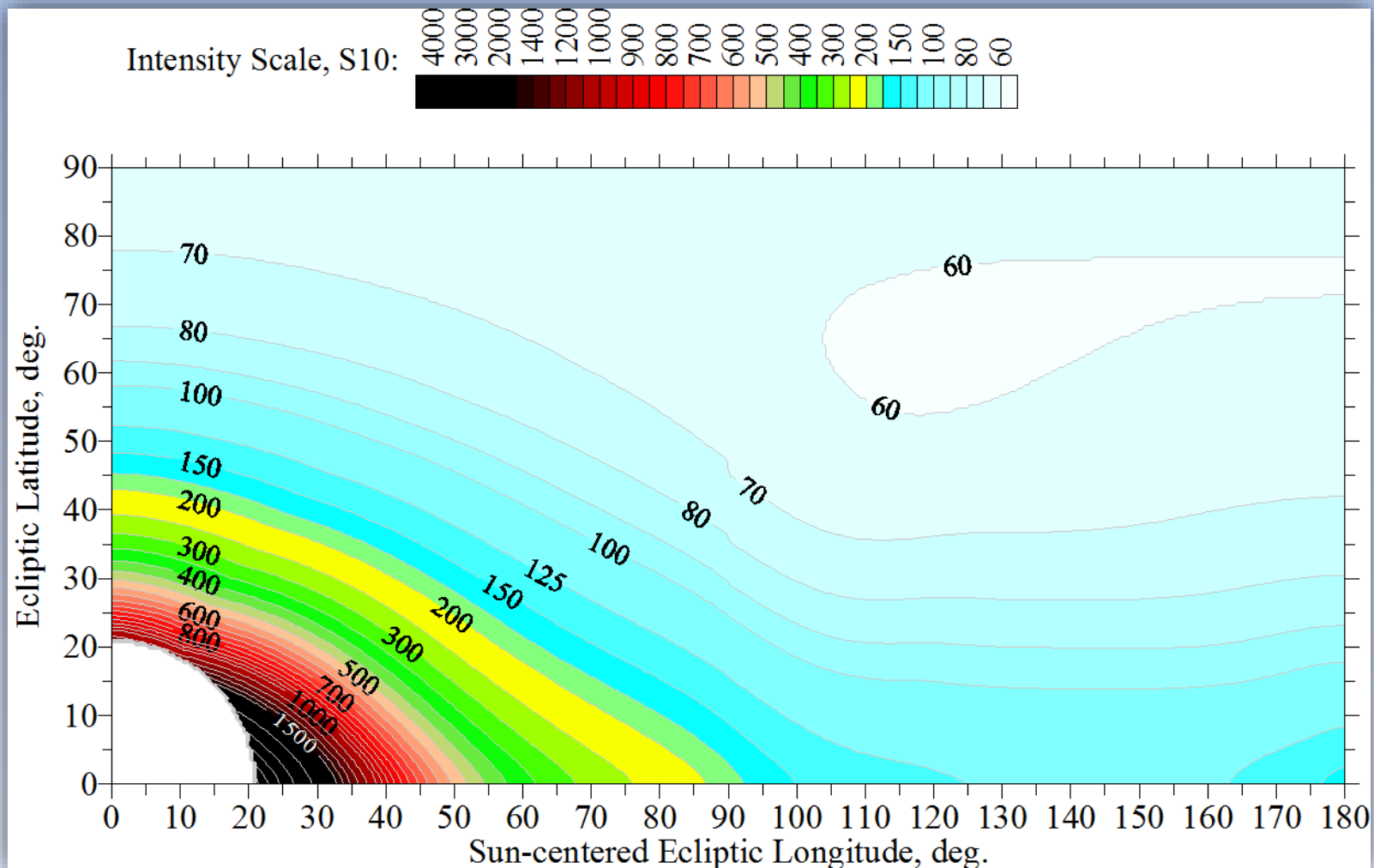


David Lane 2017

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.

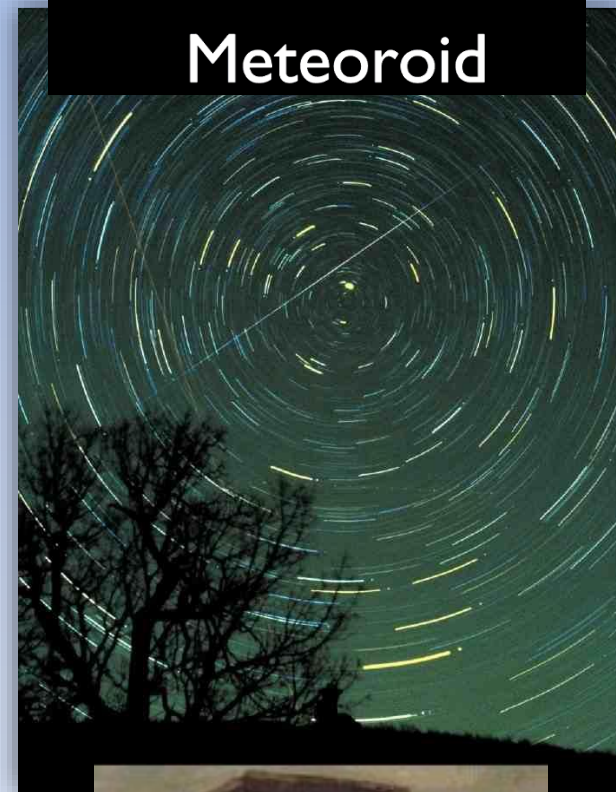
Z meteoroidami związane są dwa pojęcia o podobnych nazwach:

- **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.

Obserwacje ich spadków pozwalają lepiej przewidywać skutki takich zdarzeń.



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 znajdowane na Ziemi pochodzą głównie z wewnętrznej części Układu Słonecznego (>90%).



meteoryt żelazny i skalno-żelazny



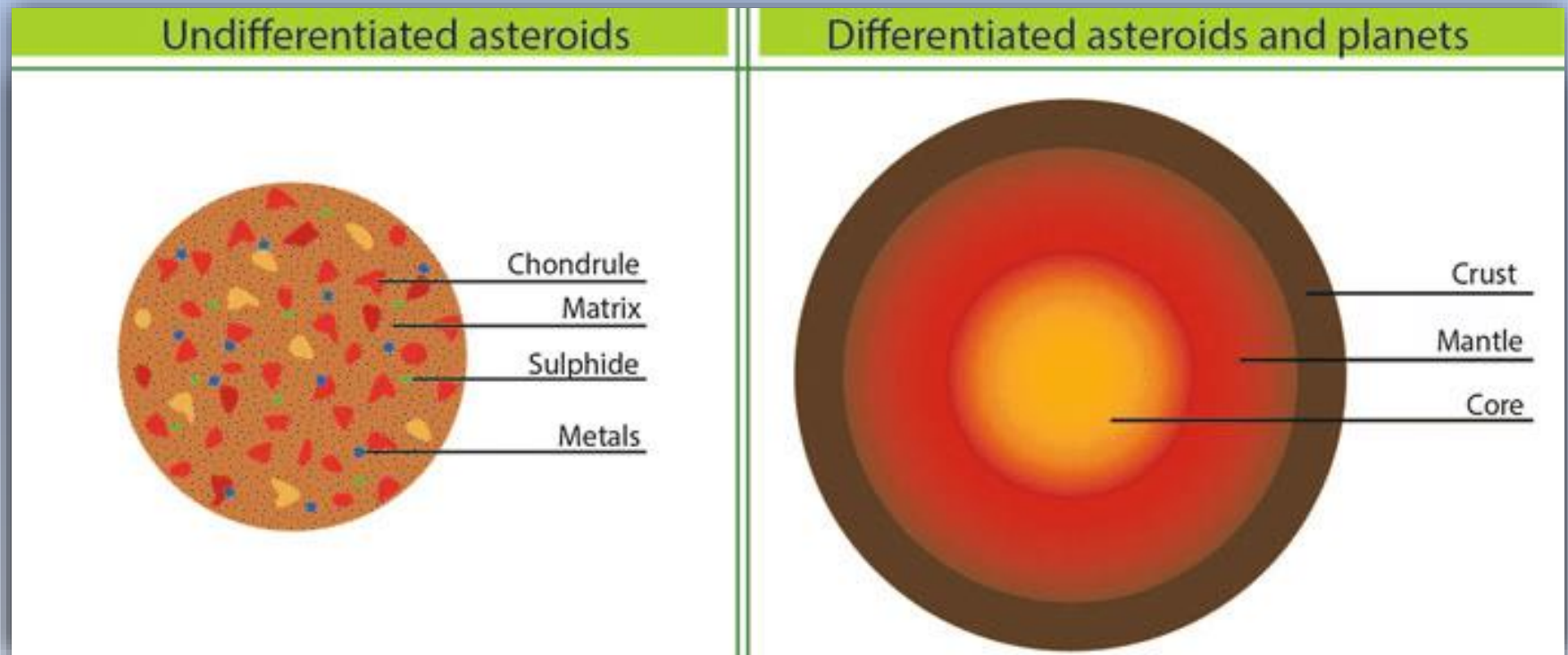
meteoryt skalny

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



Dyferencjacja – proces separacji składników ciała planetarnego w wyniku którego najgęstszy materiał osiada do środka i powstaje budowa warstwowa typu jądro, płaszcz, skorupa. Dyferencjacja zachodzi w magmie. Zatem ciała, które są zdyferencjonowane, musiały przejść fazę całkowitego stopienia.

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-kamiennie
 - żelazne

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



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 zawieszone 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 (abłacja, 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



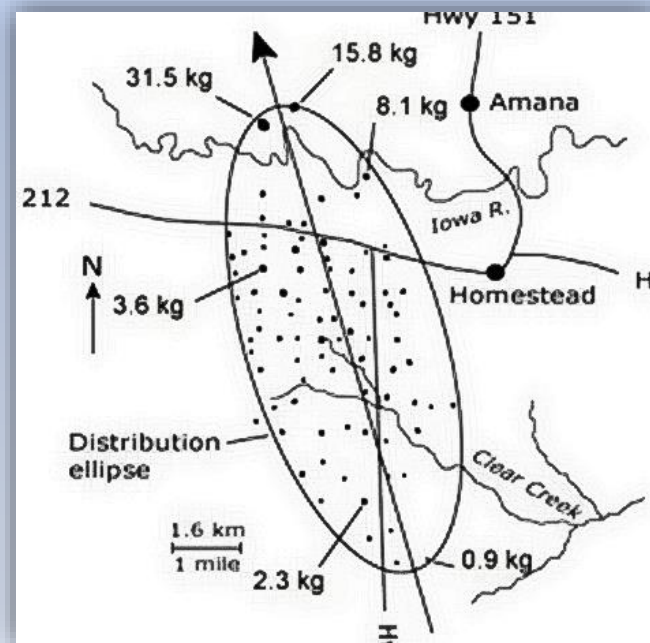
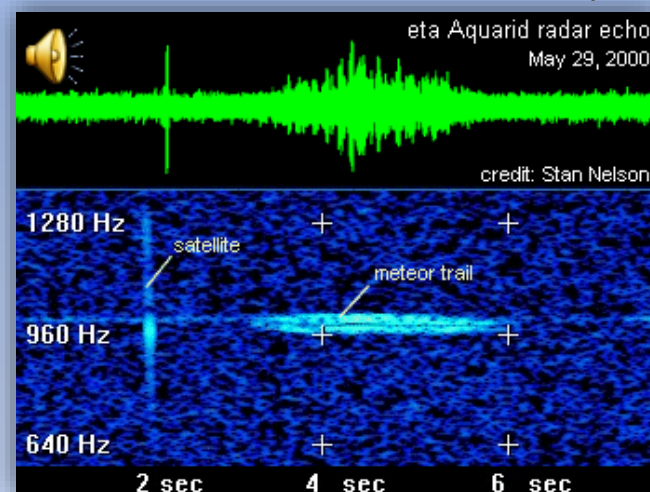
Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

meteoroidy

Przebieg 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
- 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



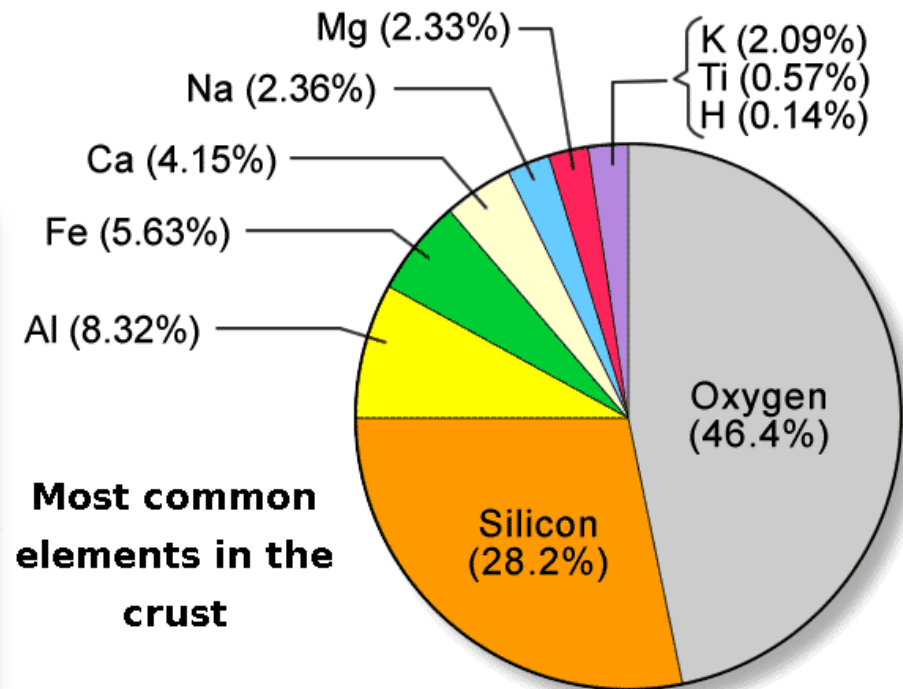
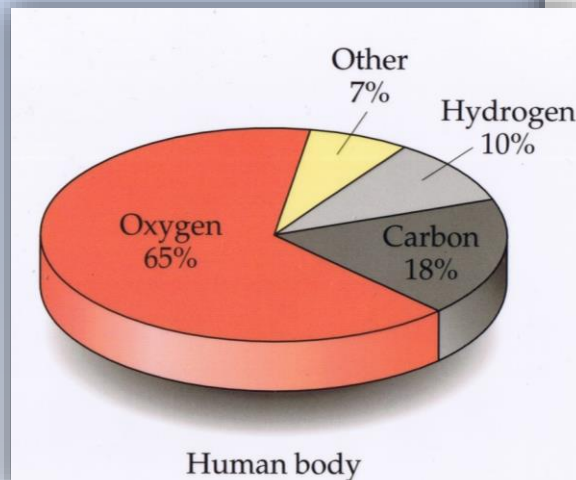
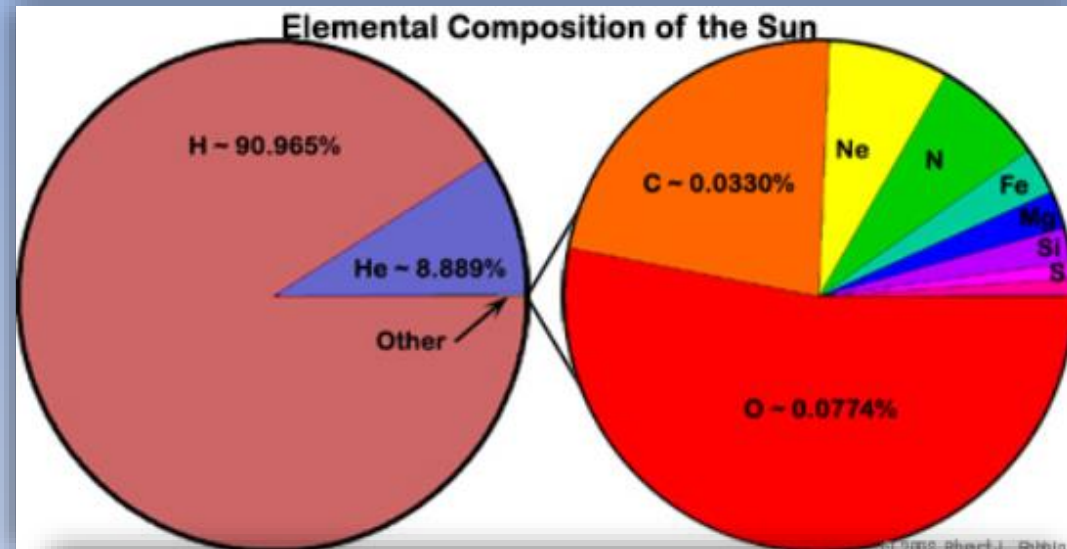
Pole spadku (elipsa rozrzutu) meteorytu
Homestead (Iowa, USA, 12.02.1875)

Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

Meteoroidy – określanie słonecznego składu chemicznego (składu materii, z której powstał US)

Skład chemiczny skorupy ziemskiej (i innych dużych obiektów) nie odzwierciedla słonecznej obfitości pierwiastków.

Głównymi źródłami danych o słonecznym składzie chemicznym są badania spektroskopowe Słońca (fotosfera) i badania laboratoryjne meteorytów.



Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

Meteoroidy – określanie słonecznego składu chemicznego

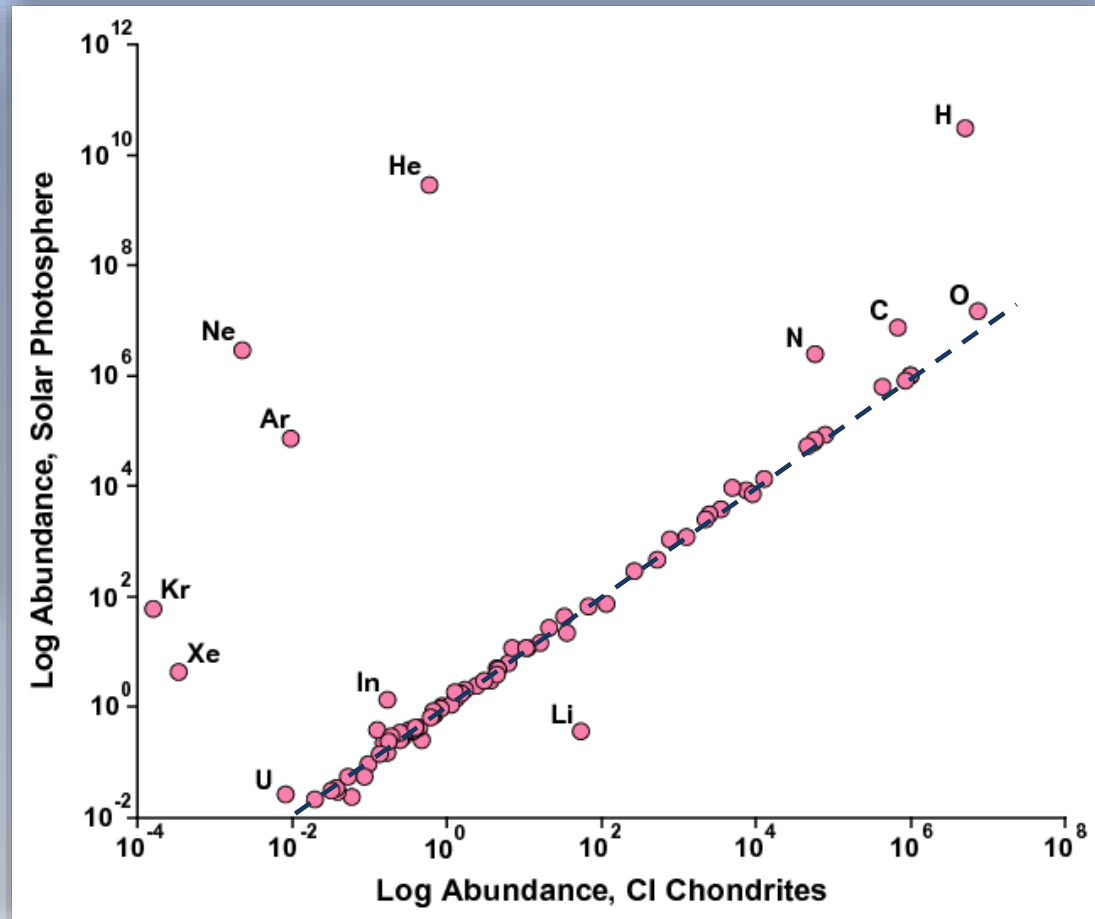
- Meteoryty są łatwo dostępnym źródłem najstarszego i najbardziej pierwotnego materiału skalnego dostępnego do badań.
- Skład chemiczny materii dysku protoplanetarnego najlepiej zachowany jest w chondrytach, a szczególnie w **chondrytach węglistych grupy CI** (bardzo mało okazów).
- Uwaga – pierwiastki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



meteoryt Ivuna (grupa CI)

Porównanie obfitości pierwiastków wyznaczonych
z badań meteorytów i fotosfery Słońca

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 prom. kosmicznego, 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



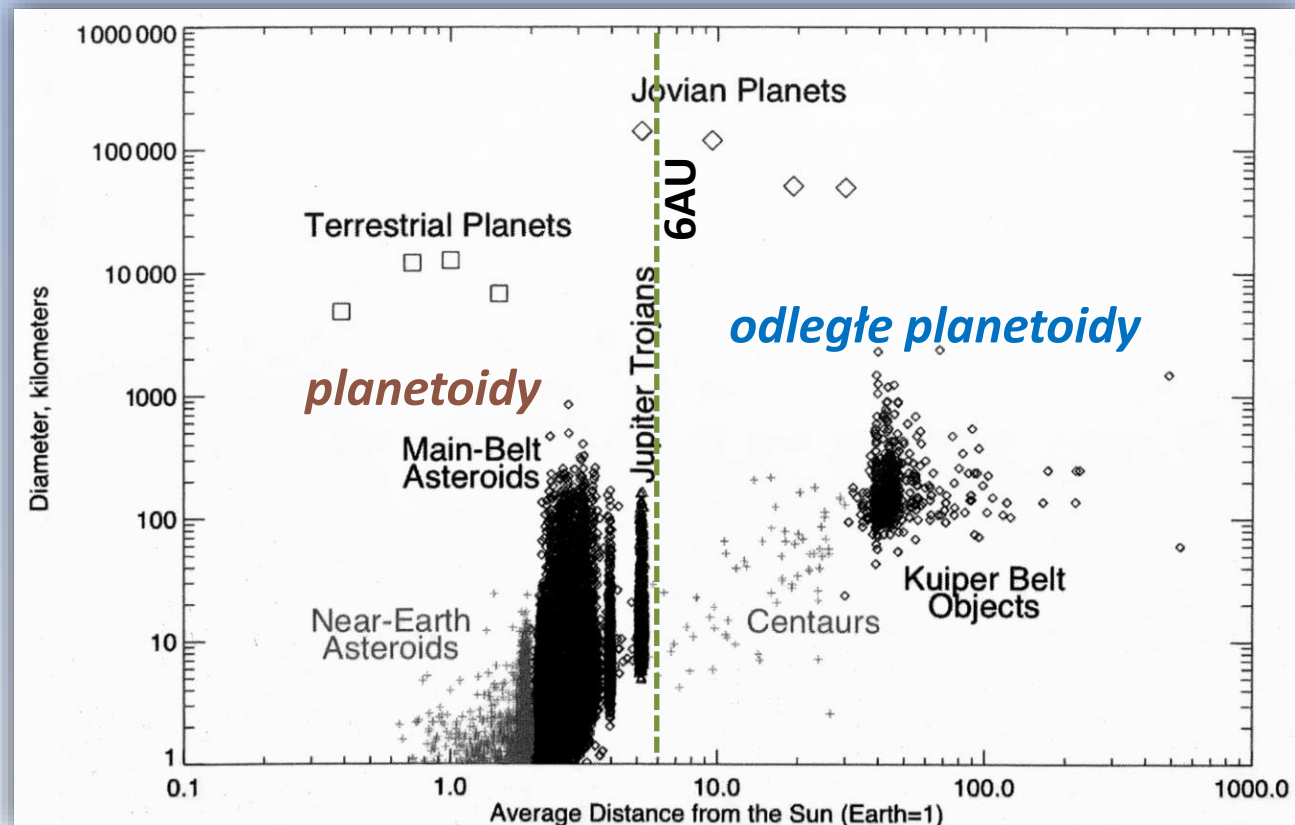
Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

planetoidy

Małe ciała Układu Słonecznego o rozmiarze od ≈ 10 m do kilkuset km to tzw. planetoidy (minor planets). Są wśród nich obiekty niezdyferencjonowane i zdyferencjonowane. Planetoidy mają różny skład chemiczny. Część z nich zawiera istotną ilość lodu. Na podstawie widma dzieli się je na klasy (typy) spektralne. Planetoidy można uważać za reliktywne planetozymale (źródło informacji o formowaniu się Układu Słonecznego), ale należy pamiętać o ich ewolucji, która zaszła między uformowaniem się a czasem obecnym.

Główna (dynamiczna) 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

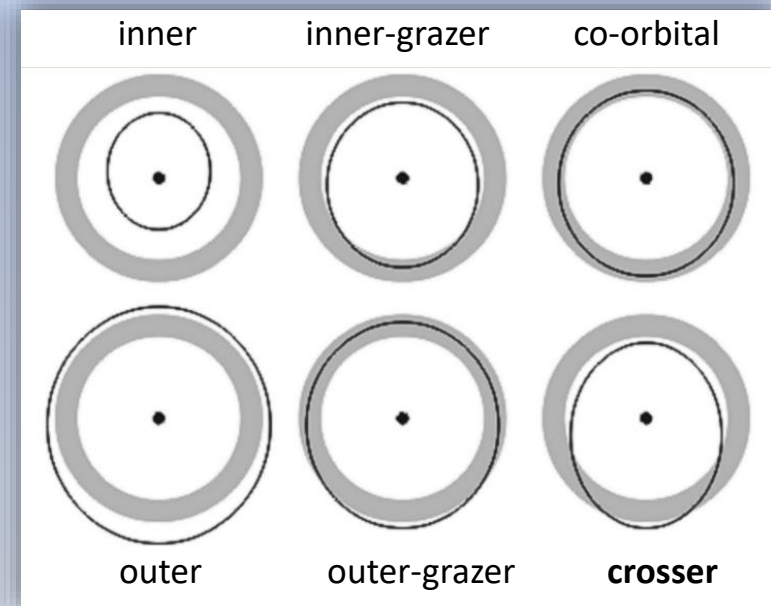
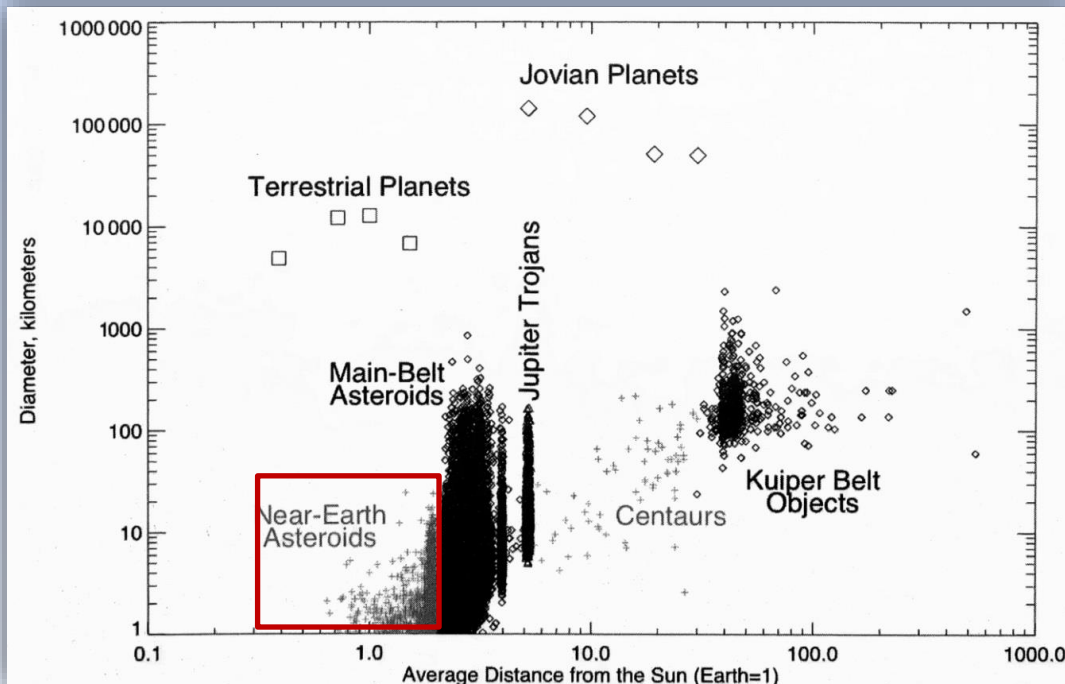


Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

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: $>40\,000$; rozmiary do kilkunastu km; gęstości: $1 - 3 \text{ g/cm}^3$ (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 L_4 i L_5 układu Słońce - planeta wewnętrzna (Wenus - 1, Ziemia - 2, Mars - 17)
- *wulkanoidy* (vulcanoids) – hipotetyczne planetoidy krążące wewnątrz orbity Merkurego

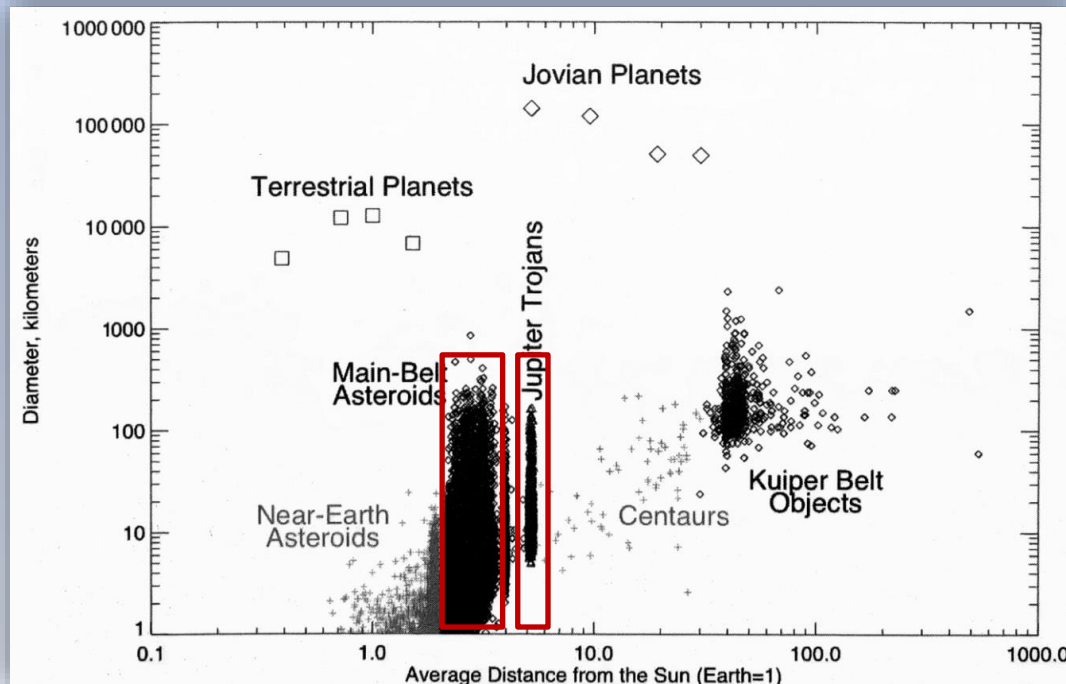


typy orbit planetoid (czarna linia, szary pas to obszar orbity planety (peryhelium - aphelium))

Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

bliskie planetoidy

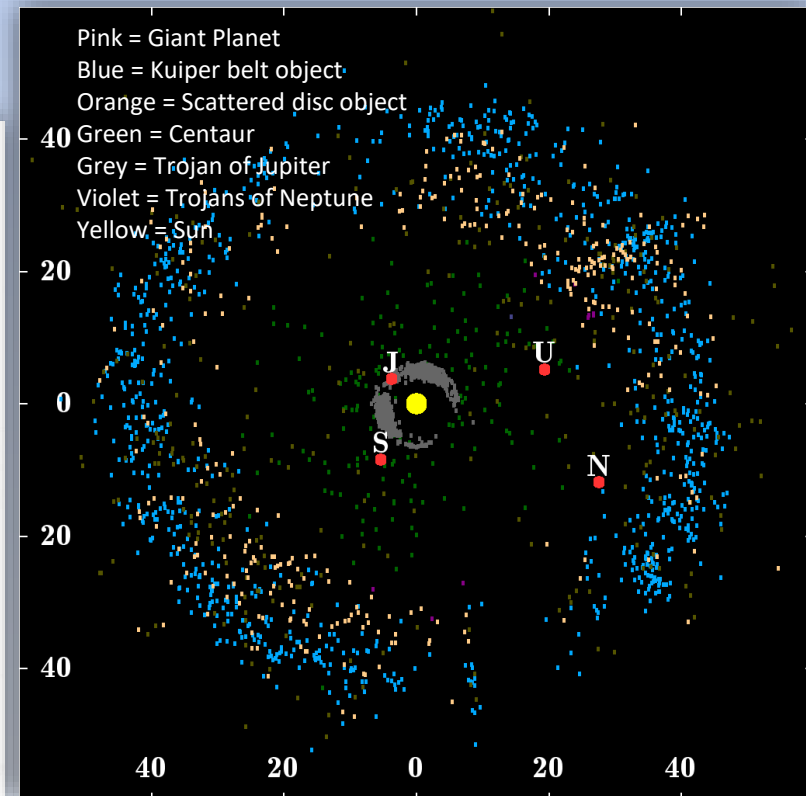
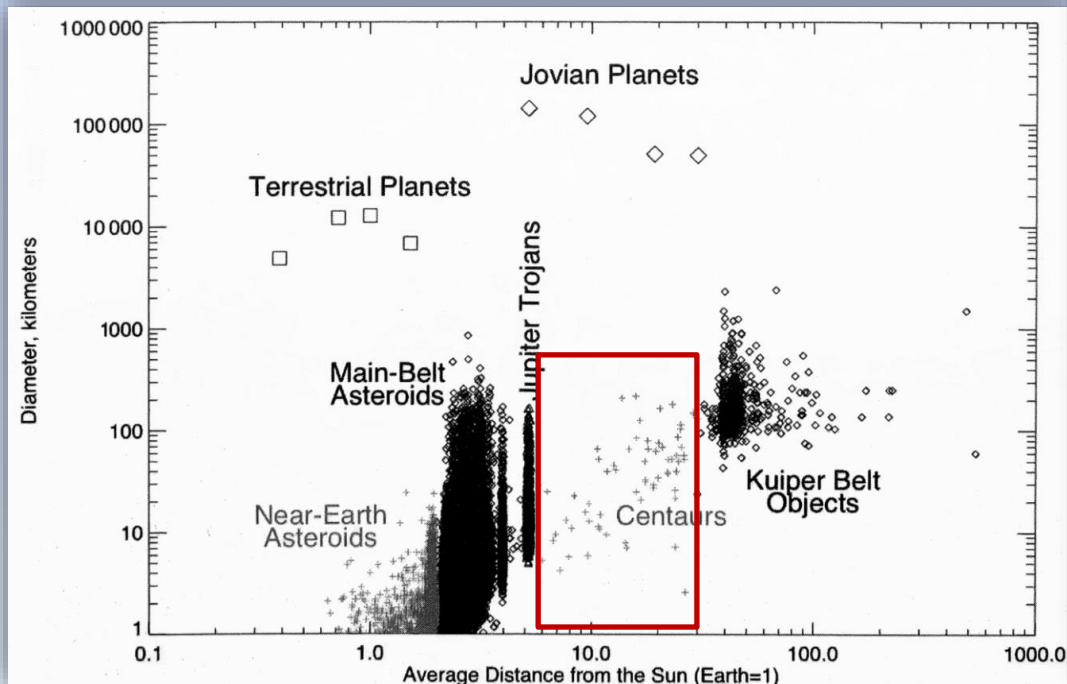
- *główny pas planetoid* (MBA - Main Belt Asteroids) – planetoidy krążące po mało eliptycznych, w większości stabilnych orbitach w odległości 2.1 - 3.3 AU; oczekiwana liczba obiektów: >1 mln (>1 km); rozmiary do ponad 200 km; gęstości: 1 - 3 g/cm³ (obiekty zawierające lód, skałę i metal, porowate/zwarte); 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 do kilku milionów (>1 km); rozmiary do ponad 200 km;
- *planetoidy trojańskie Neptuna, Urana, Saturna* – planetoid poruszających się w pobliżu punktów L_4 i L_5 układu Słońce - Neptun (Uran, Saturn); znanych obiektów: Neptun - 31, Uran – 2, Saturn – 1

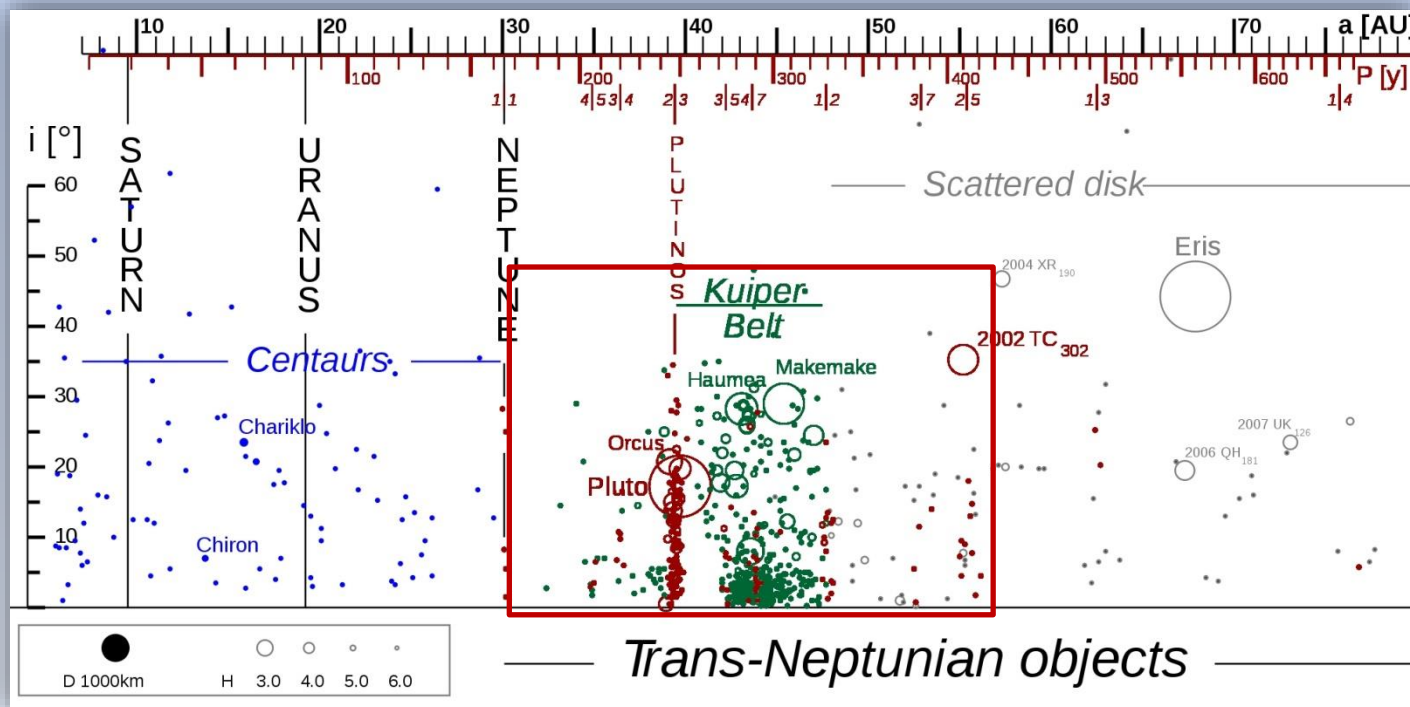


Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

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 do ponad 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 mimośrody; rezonans orbitalny z Neptunem, np.: 3:2 - Plutonki

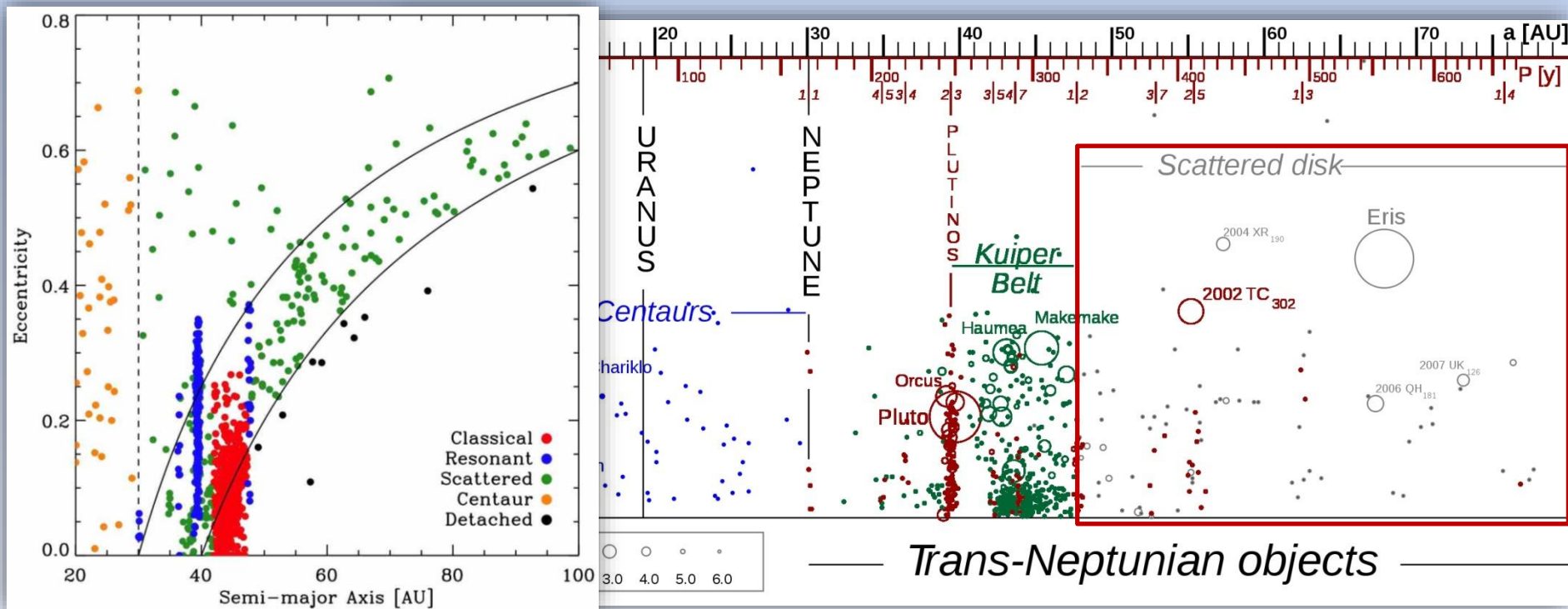


Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

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 ?)

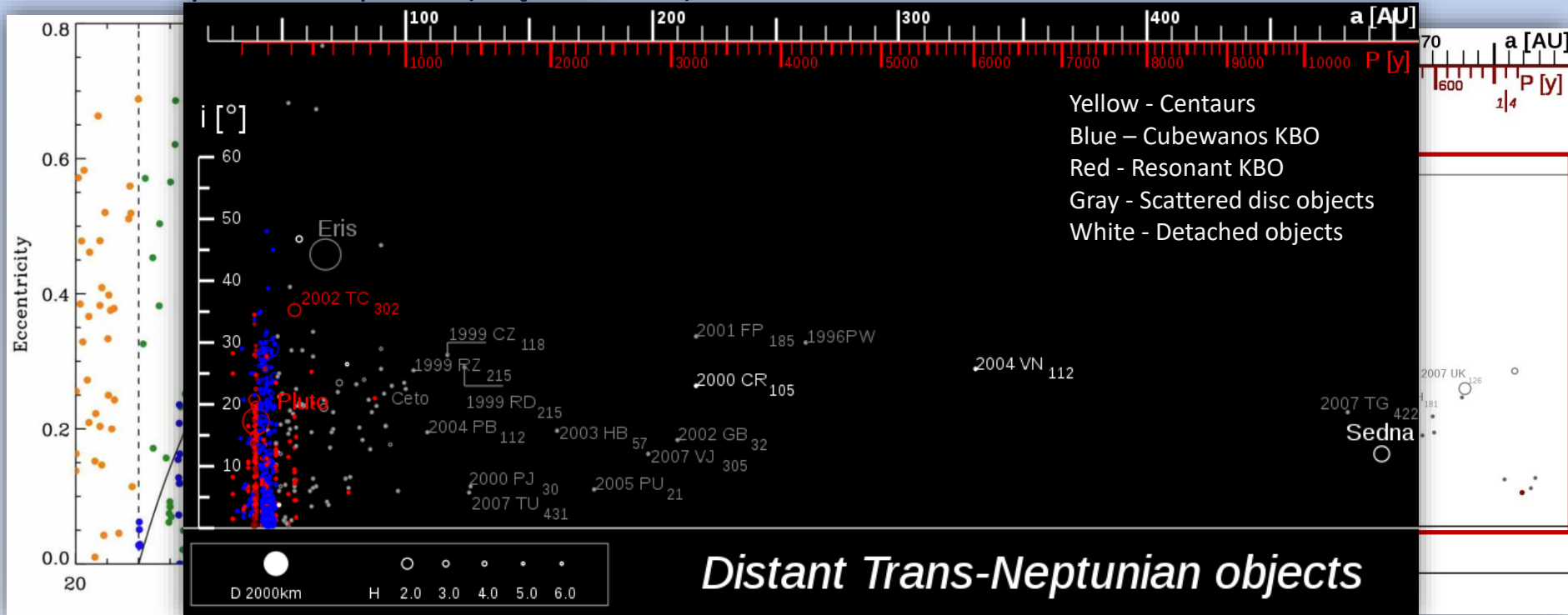


Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

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 ?)

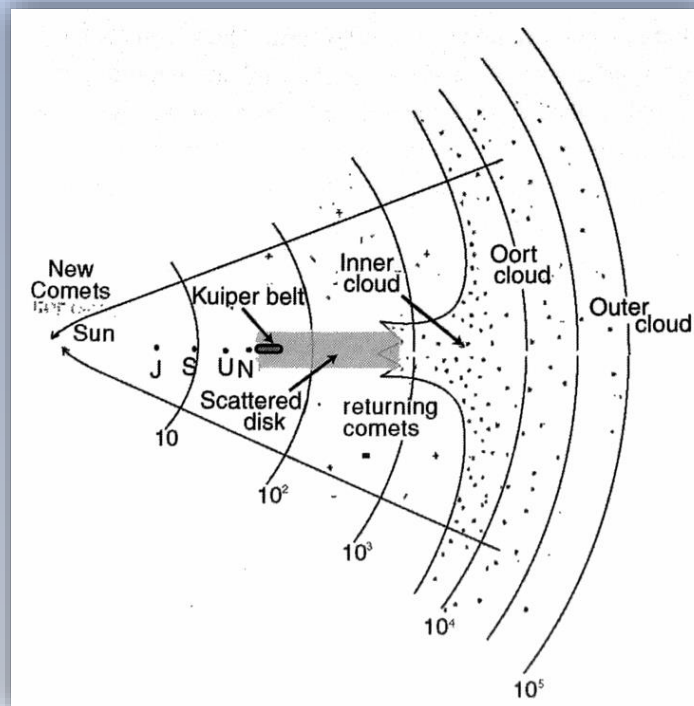


Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

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 (?)



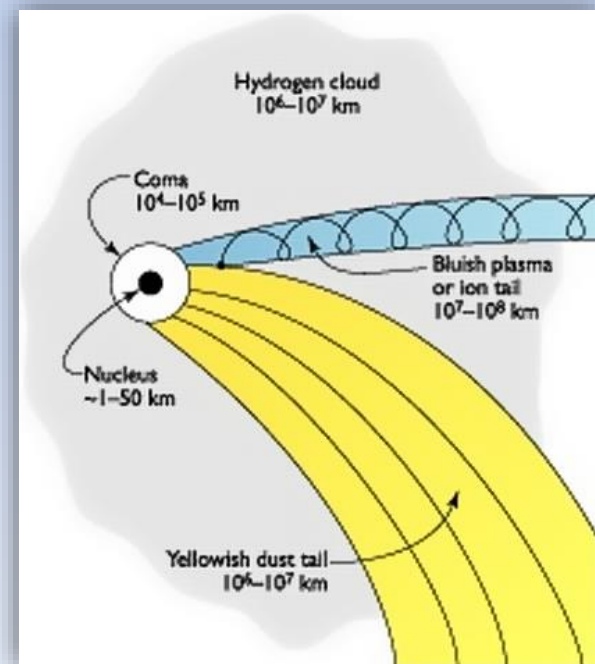
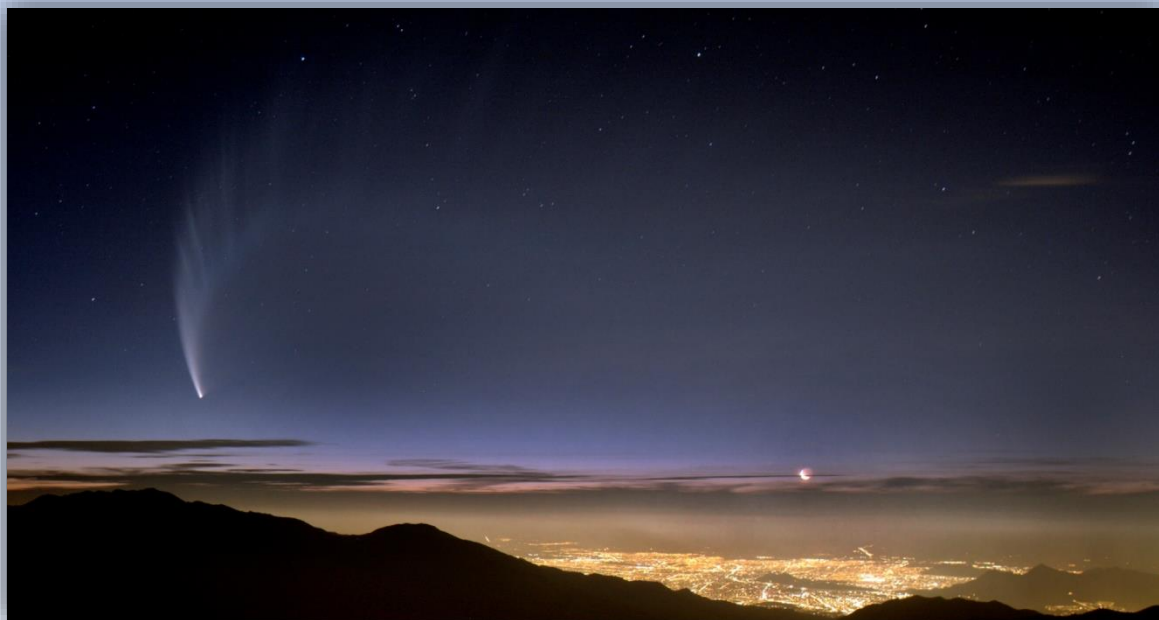
Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

komety

Komety należą do najbardziej widowiskowych obiektów astronomicznych. Zjawisko komety składa się z *komy* (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.

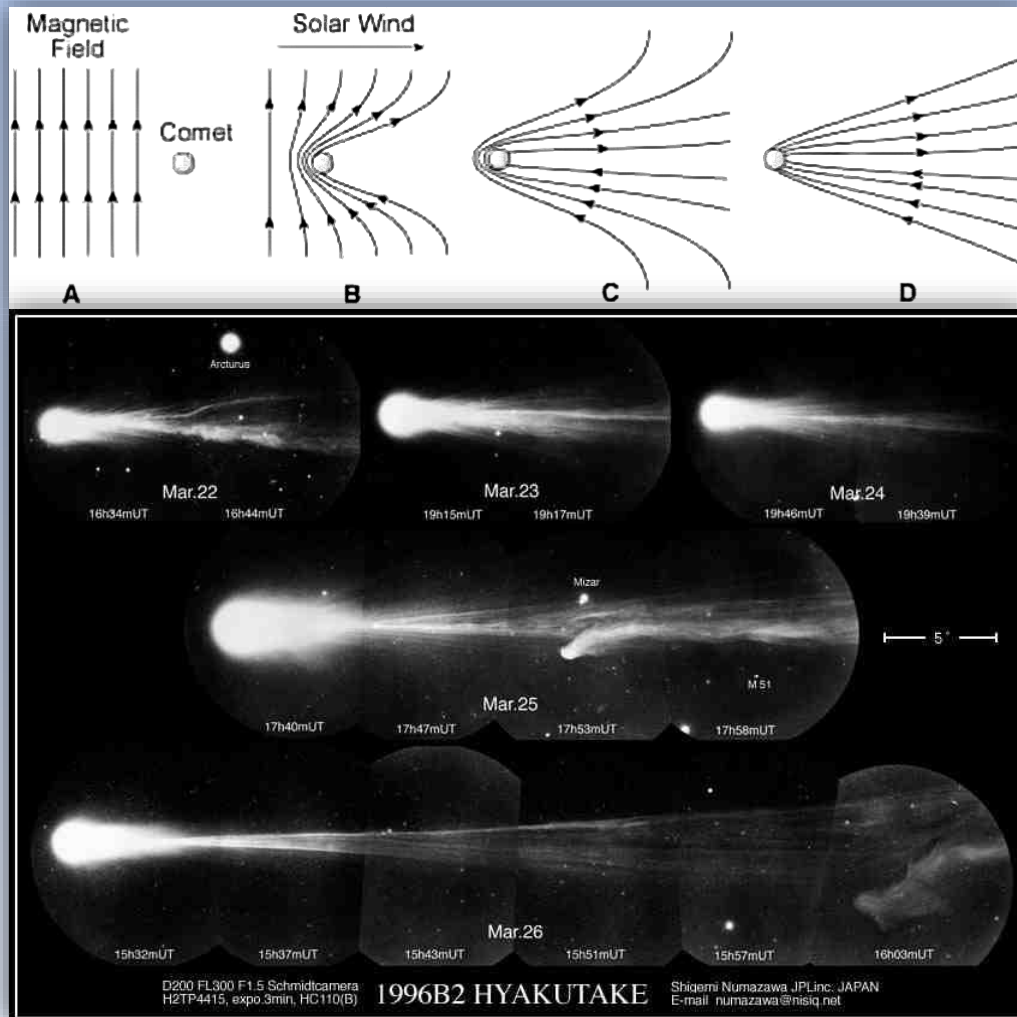
Aktywność kometarna wywoływana jest przez ogrzewanie komety przez Słońce. Dostarczona energia powoduje sublimację lodu. Sublimujący gaz pociąga za sobą pył. Aktywność pojawia się zwykle na odległości 3 AU (czasem nawet 20 AU).



Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

komety

Gaz ulatujący z jądra ulega jonizacji (fotojonizacja i wymiana ładunku) i oddziałuje z wiatrem słonecznym i jego polem mag. 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

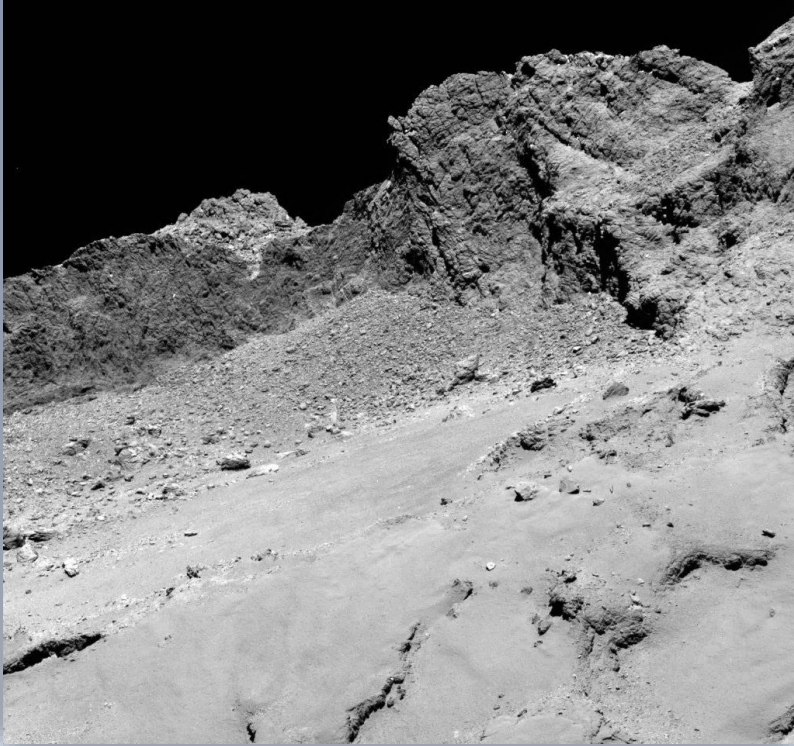
komety

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 (porowatą), nieregularną bryłą zbudowaną głównie z materiału lodowego (lody astrofizyczne) z domieszką materiału skalnego i związków organicznych.

Powierzchnia jądra może mieć bardzo małe albedo, poniżej 0.05 („czarne jak smoła”) – skorupa z materiału skalnego i organicznego, pozbawiona lodu. Może utrudniać sublimację.

jądro komety Churyumov–Gerasimenko



jądro komety Tempel 1



Małe ciała, pierścienie, pył i gaz

pierścienie

- Jowisz (1979) – pierścienie rozległe, ale rzadkie (cienkie optycznie); cząstki mikrometrowe (krzemiany)
- Saturn (1610, 1656) – główne pierścienie rozległe, grube optycznie; cząstki o rozmiarze cm-m (lód); pierścienie zewnętrzne rzadkie; cząstki mikrometrowe (lód)
- Uran (1977) – główne pierścienie wąskie, grube optycznie; cząstki o rozmiarach cm-m (lód, ale ciemna powierzchnia); pozostałe pierścienie rzadkie; cząstki mikrometrowe
- Neptun (1984) – pierścienie wąskie, rzadkie (za wyjątkiem nieco gęstszych łuków); cząstki mikrometrowe o niskim albedo

powstanie, czas istnienia, oddziaływanie z księżycami,...

Diagram pierścieni i wewnętrznych księżyców planet olbrzymów. Diagram przeskalowany promieniem równikowym planety. Linia przerywana długa oznacza odległość, na której okres orbitalny równy jest okresowi obrotu planety. Linia przerywana krótka oznacza granicę Roche'a dla ciał o gęstości 1 g/cm^3 .

