

Astrofizyka Układów Planetarnych

1

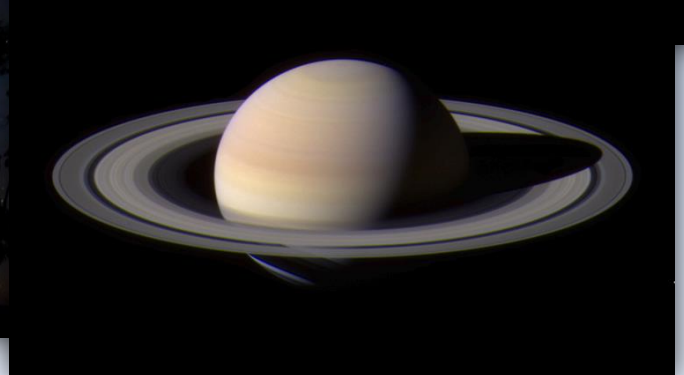
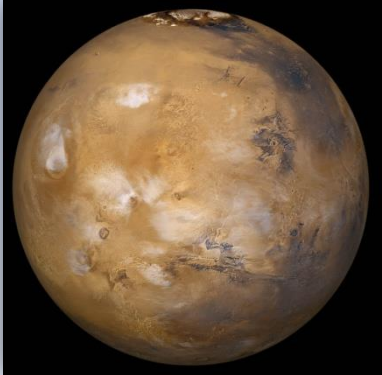
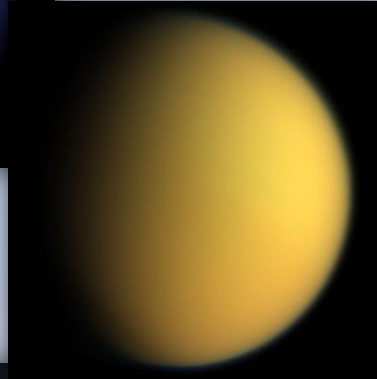
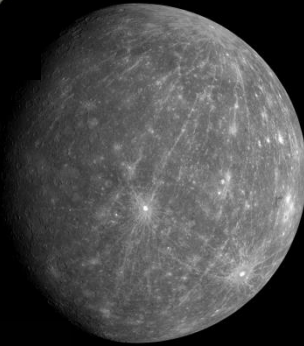
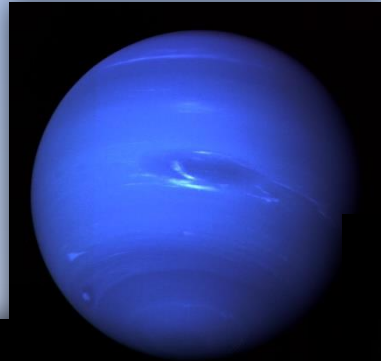
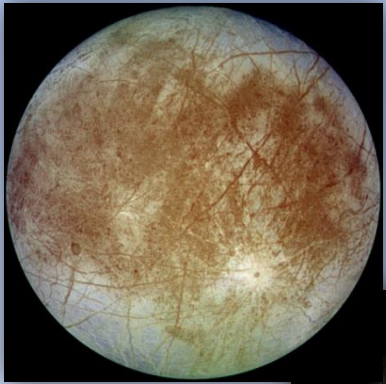
(WSZECH)ŚWIAT
UKŁADÓW PLANETARNYCH



Układ Słoneczny (planetarny) – co to jest?

układy planetarne – największa koncentracja różnorodności we Wszechświecie

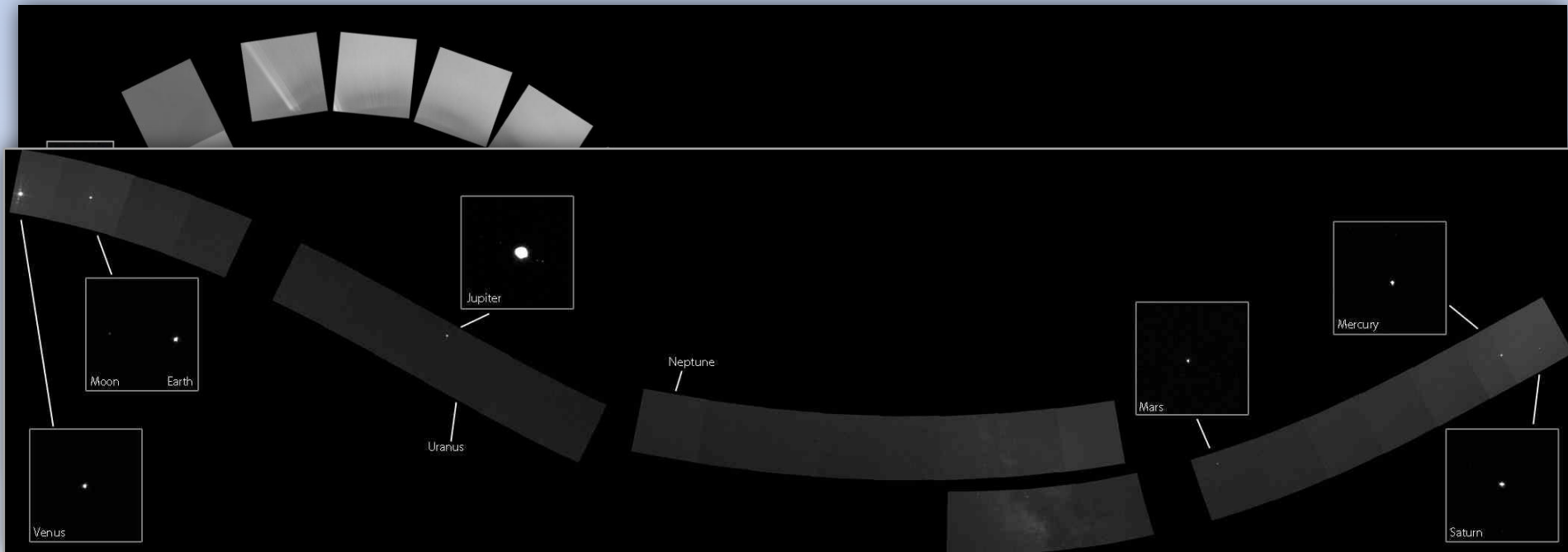
ten sam budulec + takie same prawa fizyki = różnorodność światów



Układ Słoneczny (planetarny) – co to jest?

Spojrzenie z zewnątrz:

1. **masa:** **Układ Słoneczny = Słońce + drobiazg** (99.8% masy całości)
2. **jasność:** **Układ Słoneczny = Słońce + drobiazg** (4×10^8 x jasność Jowisza)
3. **moment pędu:** **Układ Słoneczny = planety + drobiazg** (98% m.p. całości)
4. **typ materii:** **plazma** (Słońce, wiatr słoneczny), **materia molekularna** (planety, drobniejsze ciała)
5. **wydzielanie energii:** **synteza termojądrowa** (Słońce), **rozpad promieniotwórczy, energia grawitacyjna** (planety, drobniejsze ciała)



Układ planetarny składa się z planet i...

...ale co to jest planeta?

Układ Słoneczny (planetarny) – definicja planety

Układ planetarny składa się z planet i ... (*ale co to jest planeta?*)

- starożytność – XVII w.

asteres planetai (błądzące gwiazdy) – obiekty nie będące gwiazdami stałymi, zmieniające swoje położenie na niebie.

obiekty zaliczane: **Merkury, Wenus, Mars, Jowisz, Saturn, (Ziemia, Księżyc, Słońce)**

- XVIII w. – XX w.

pomimo nowych odkryć, brak nowej definicji planety

obiekty zaliczane: **Merkury, Wenus, Ziemia, Mars, Jowisz, Saturn, Uran, Neptun, Pluton, Ceres, Westa, ...**

- XXI w.

odkrycia kolejnych obiektów transneptunowych i planet pozasłonecznych zmuszają do jasnego określenia co to jest planeta

decyzję podjęto **24.08.2006** w czasie **IAU 26th General Assembly** (Praha, Republika Czeska)

Układ Słoneczny (planetarny) – definicja planety

Kryteriów sporo, jednak wiele z nich zawodzi. Przynajmniej w pojedynkę.

kryterium

problemy

ruch względem gwiazd

dopuszcza wszystkie obiekty Układu Słonecznego włącznie z kometami, planetoidami i sondami

obecność satelitów

odrzuca Merkurego, Wenus
może zależeć od czasu

obecność atmosfery

praktycznie odrzuca Merkurego
problem z określeniem minimalnej atmosfery

obecność pola magnetycznego

odrzuca Wenus

ruch po orbicie bliskiej kołowej

odrzuca Merkurego
problem z określeniem dopuszczalnego maksimum

orbita wokół gwiazdy

dopuszcza nawet drobne obiekty
odrzuca obiekty wyrzucone z układu planetarnego

odbija więcej energii niż wytwarza

odrzuca planety olbrzymie
odrzuca młode gorące planety

Układ Słoneczny (planetarny) – definicja planety

definicja planety według IAU (dla Układu Słonecznego)

planeta to ciało niebieskie, które:

- a) znajduje się na orbicie wokół Słońca
- b) ma wystarczającą masę, aby jego siła grawitacji przekraczała siły sztywności tego ciała, prowadząc do osiągnięcia kształtu odpowiadającego równowadze hydrostatycznej
- c) oczyściło sąsiedztwo swojej orbity

planeta karłowata to ciało niebieskie, które:

- a) znajduje się na orbicie wokół Słońca
- b) ma wystarczającą masę, aby jego siła grawitacji przekraczała siły sztywności tego ciała, prowadząc do osiągnięcia kształtu odpowiadającego równowadze hydrostatycznej
- c) nie oczyściło sąsiedztwa swojej orbity
- d) nie jest satelitą

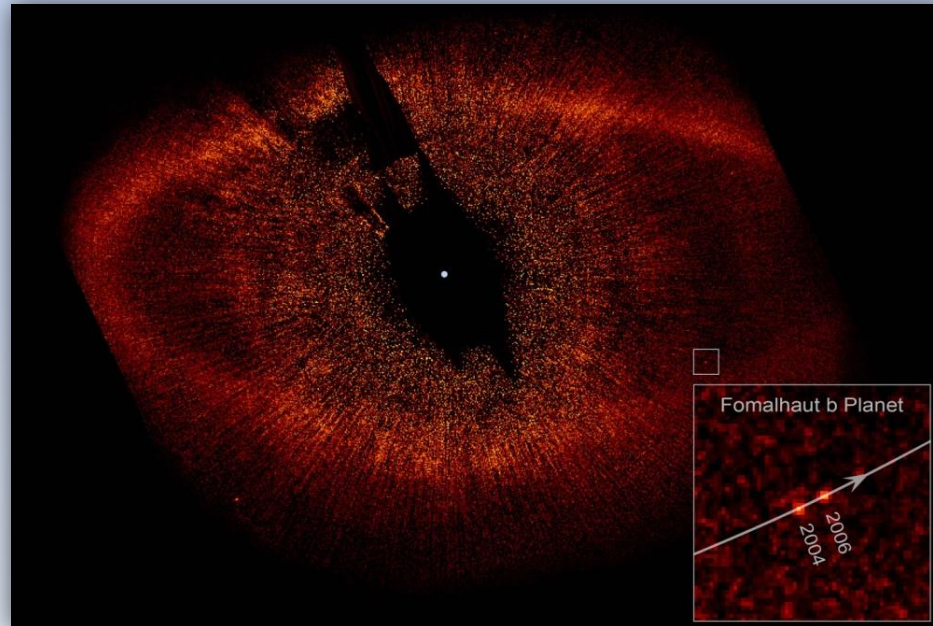
Pozostałe obiekty, z wyjątkiem księżyców i pierścieni, nazywane są **małymi ciałami Układu Słonecznego**.

Układ Słoneczny (planetarny) – definicja planety

Ogólna definicja planety nie została sformułowana, ale rozsądnym byłoby połączenie definicji IAU dla Układu Słonecznego z definicją Grupy Roboczej ds. Planet Pozasłonecznych IAU.

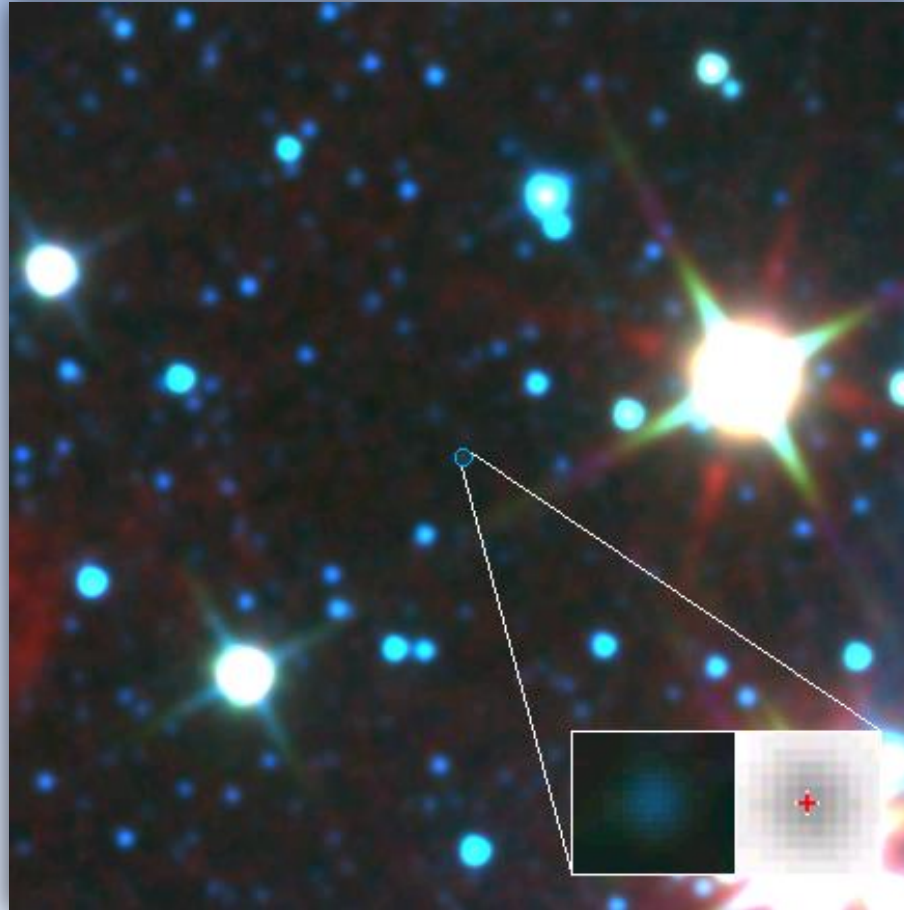
planeta to ciało niebieskie, które:

- a) znajduje się na orbicie wokół gwiazdy lub pozostałości po gwiazdzie
- b) ma masę mniejszą niż masa graniczna wymagana dla reakcji termojądrowej z udziałem deuteru (około $13 M_J$)
- c) ma wystarczającą masę, aby jego siła grawitacji przekraczała siły sztywności tego ciała, prowadząc do osiągnięcia kształtu odpowiadającego równowadze hydrostatycznej
- d) oczyściło sąsiedztwo swojej orbity



Układ Słoneczny (planetarny) – definicja planety

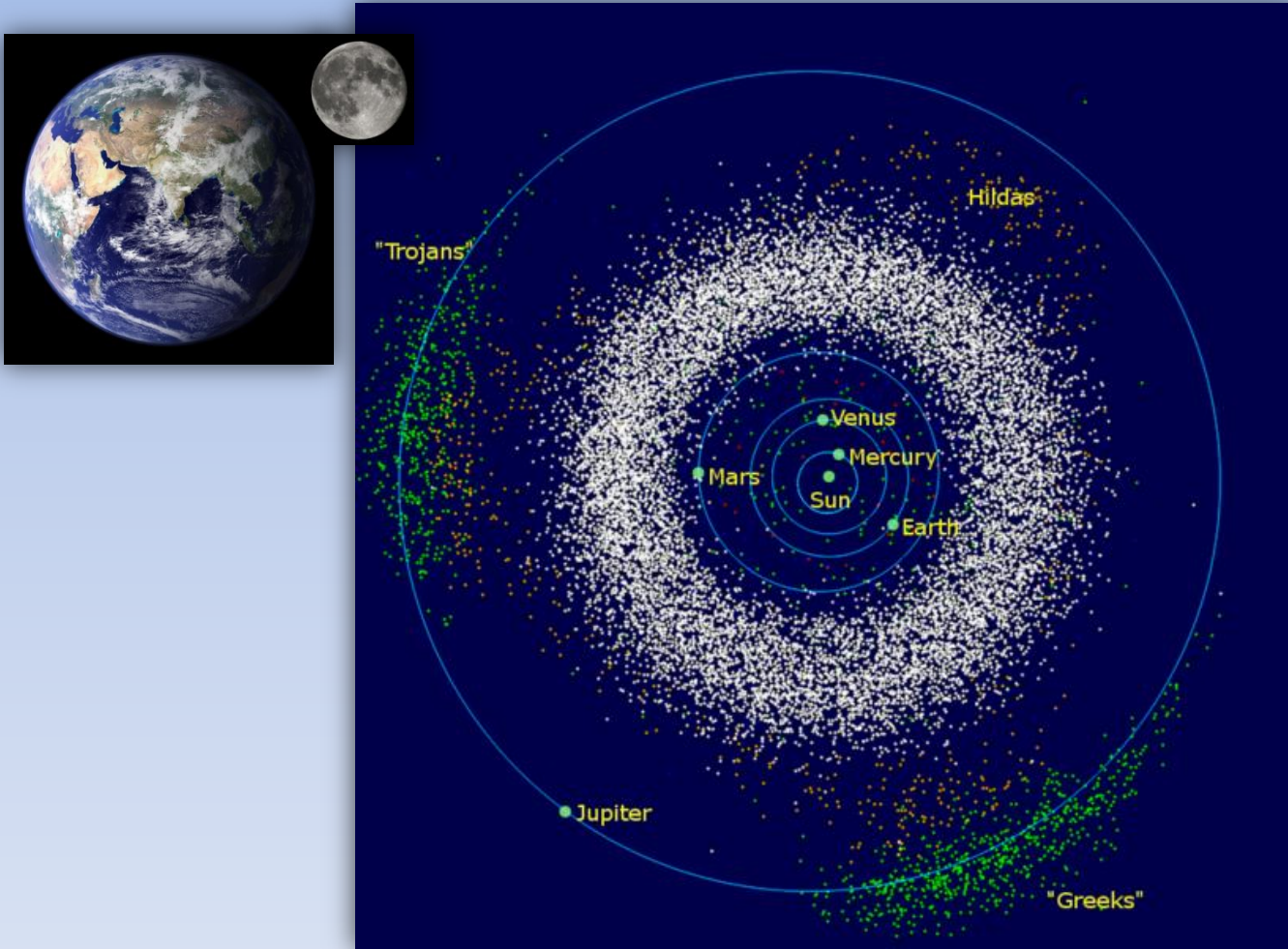
A planety bez gwiazd?



Cha 110913-773444 – brązowy podkarzeł czy planeta swobodna?

Układ Słoneczny (planetarny) – definicja planety

co znaczy określenie „*oczyściło sąsiedztwo swojej orbity*” w definicji planety?



Czy planety skaliste mogą nosić miano planety?
Ich otoczenie nie jest „oczyszczone”.
Ziemia ma dużego satelitę.

Układ Słoneczny (planetarny) – definicja planety

co znaczy określenie „*oczyściło sąsiedztwo swojej orbity*” w definicji planety?

Jakościowo:

grawitacyjna dominacja, brak obiektów o porównywalnych rozmiarach (z wyjątkiem własnych satelitów i innych obiektów będących pod kontrolą grawitacyjną)

Ilościowo:

wartość parametru Λ większa od 1

Parametr Λ opisuje „sprawność” ciała w pozbywaniu się innych obiektów z własnej orbity (Stern i Levison, 2002):

$$\Lambda = T/\tau = kM^2/P$$

T – czas Hubble’a, τ – charakterystyczny czas usuwania innych obiektów, k – stała, M , P – masa i okres orbitalny ciała usuwającego

wartość dyskryminatora planetarnego μ przekraczająca 100

Dyskryminator planetarny μ jest ilorazem masy ciała głównego M do sumarycznej masy obiektów w otoczeniu własnej orbity m (krzyżowanie się orbit; okresy obiegu podobne co do rzędu wielkości, ale brak rezonasu) (Soter, 2006):

$$\mu = M/m$$

W zamyśle parametr ten podaje czy ciało obiegające gwiazdę jest końcowym produktem akrecji w dysku protoplanetarnym.

Układ Słoneczny (planetarny) – definicja planety

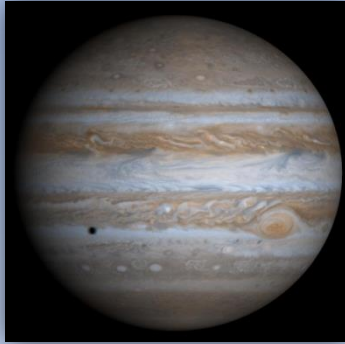
co znaczy określenie „*oczyściło sąsiedztwo swojej orbity*” w definicji planety?

obiekt	masa (M_2)	parameter Λ	dyskryminator planetarny μ	klasyfikacja
Mercury	0.055	1.95×10^3	9.1×10^4	planeta
Venus	0.815	1.66×10^5	1.35×10^6	planeta
Earth	1.000	1.53×10^5	1.7×10^6	planeta
Mars	0.107	9.42×10^2	5.1×10^3	planeta
Ceres	0.00015	8.32×10^{-4}	0.33	planeta karłowata
Jupiter	317.7	1.30×10^9	6.25×10^5	planeta
Saturn	95.2	4.68×10^7	1.9×10^5	planeta
Uranus	14.5	3.84×10^5	2.9×10^4	planeta
Neptune	17.1	2.73×10^5	2.4×10^4	planeta
Pluto	0.00218	2.95×10^{-3}	0.08	planeta karłowata
Haumea	0.00066	2.41×10^{-4}	0.02	planeta karłowata
Makemake	0.0007	2.22×10^{-4}	0.02	planeta karłowata
Eris	0.0028	2.15×10^{-3}	0.10	planeta karłowata

Układ Słoneczny – przegląd

planety olbrzymy (jowiszowe)

gazowe olbrzymy



Jowisz

$M = 318M_Z$, $R = 11R_Z$,
główne składniki: H, He



Saturn

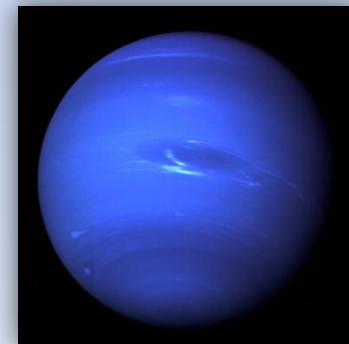
$M = 95M_Z$, $R = 9R_Z$,
główne składniki: H, He

lodowe olbrzymy



Uran

$M = 15M_Z$, $R = 4R_Z$,
główne składniki: H_2O , NH_3 , CH_4



Neptun

$M = 17M_Z$, $R = 4R_Z$,
główne składniki: H_2O , NH_3 , CH_4

Układ Słoneczny – przegląd

planety skaliste (ziemskie)

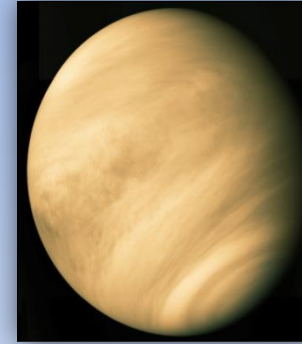
duże planety skaliste



Ziemia

$$M = 1M_Z, R = 1R_Z,$$

główne składniki: skały (krzemiany), metale



Wenus

$$M = 0.82M_Z, R = 0.95R_Z,$$

główne składniki: skały (krzemiany), metale

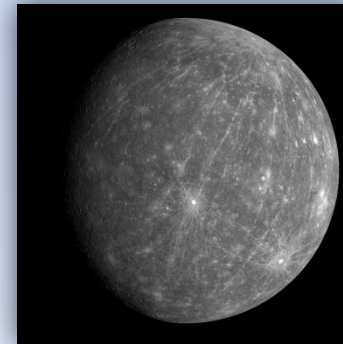
małe planety skaliste



Mars

$$M = 0.11M_Z, R = 0.53R_Z,$$

główne składniki: skały (krzemiany), metale



Merkury

$$M = 0.06M_Z, R = 0.38R_Z,$$

główne składniki: skały (krzemiany), metale

Układ Słoneczny – przegląd

planety karłowate (oficjalne)

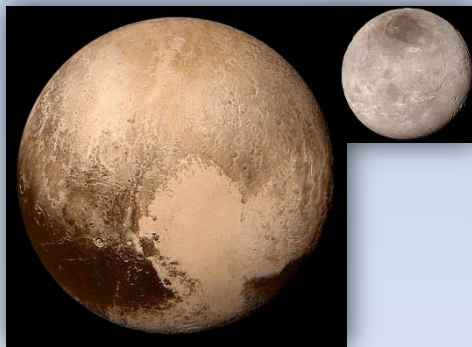
pas planetoid



Ceres

$M = 1.50 \times 10^{-4} M_Z$, $R = 0.074 R_Z$
główne składniki: skały, lód

obiekty transneptunowe



Pluton

$M = 2.18 \times 10^{-3} M_Z$, $R = 0.18 R_Z$
główne składniki: skały, lód



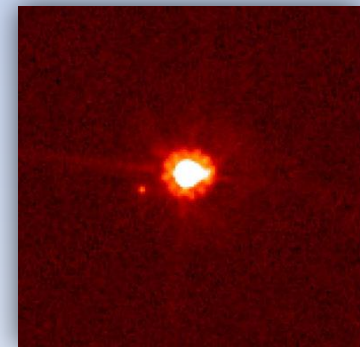
Haumea

$M = 6.6 \times 10^{-4} M_Z$, $R = 0.10 R_Z$
główne składniki: skały, lód



Makemake

$M = 5 \times 10^{-4} M_Z$, $R = 0.12 R_Z$
główne składniki: skały, lód



Eris

$M = 2.80 \times 10^{-3} M_Z$, $R = 0.18 R_Z$
główne składniki: skały, lód

Układ Słoneczny – przegląd

małe ciała:

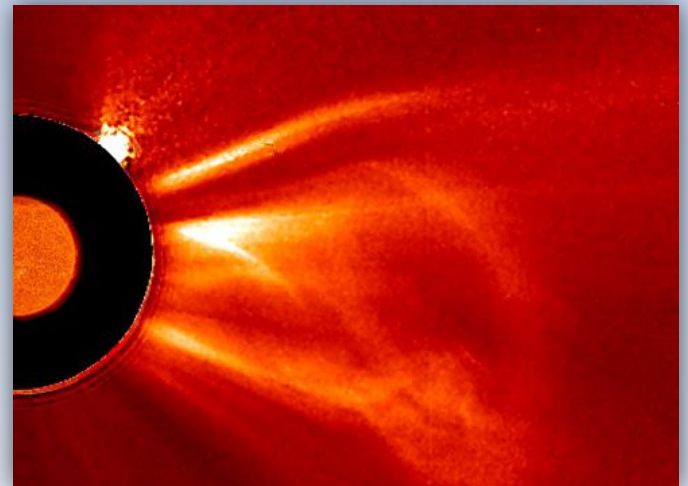
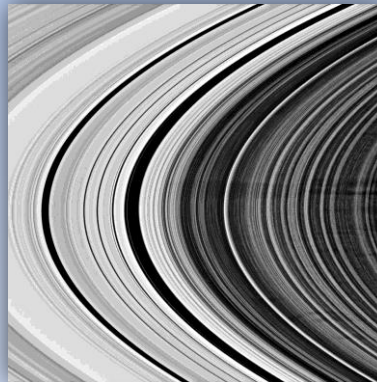
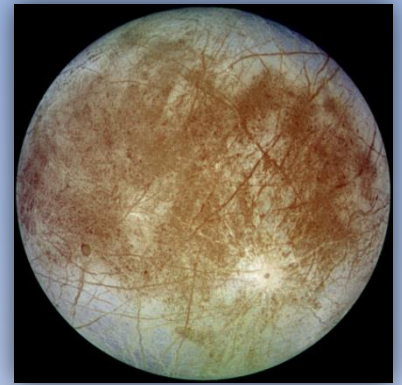
- planetoidy
- meteoroidy

księżyce

pierścienie

pył i gaz międzyplanetarny

pola magnetyczne

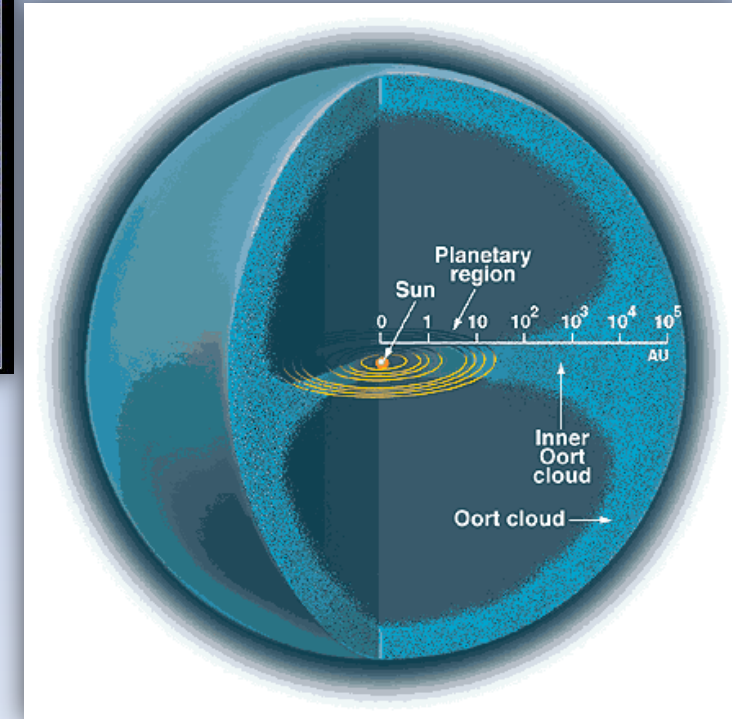
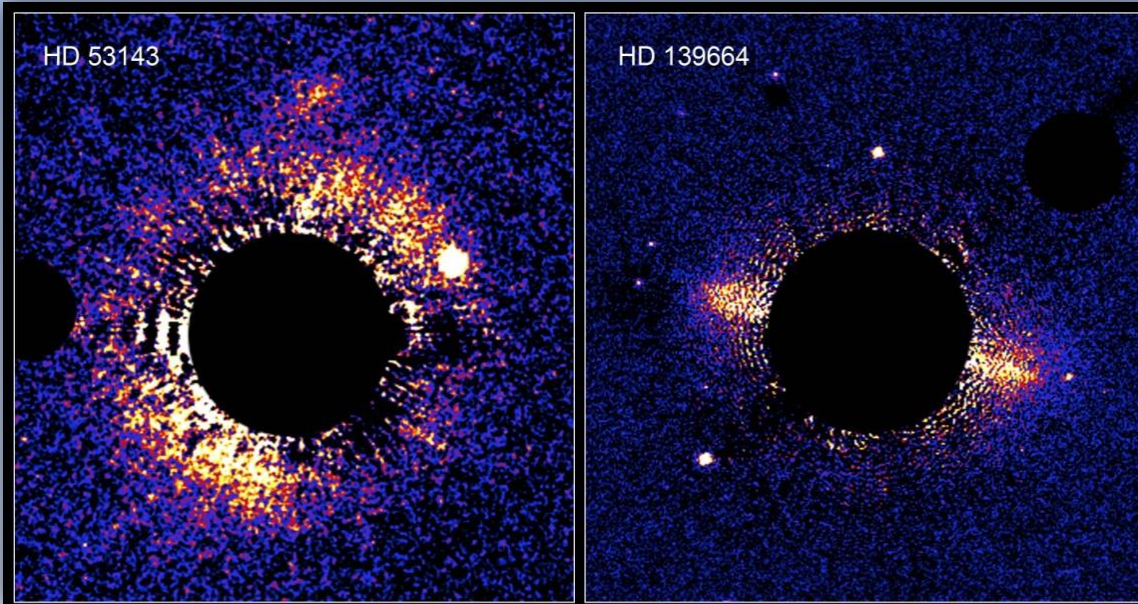


Układ Słoneczny – przegląd

granice układu słonecznego

obiekty transneptunowe

pas Kuipera (klasyczny, rezonancyjny), dysk rozproszony, dysk odłączony: 30 – (?) 1000 AU

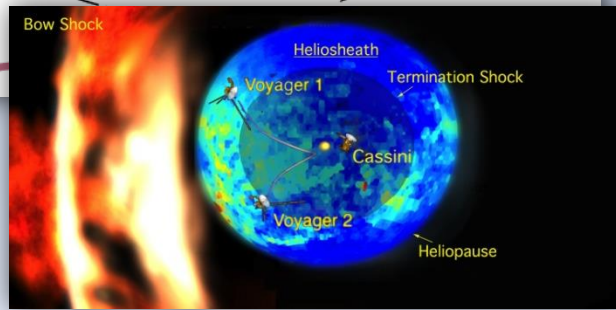
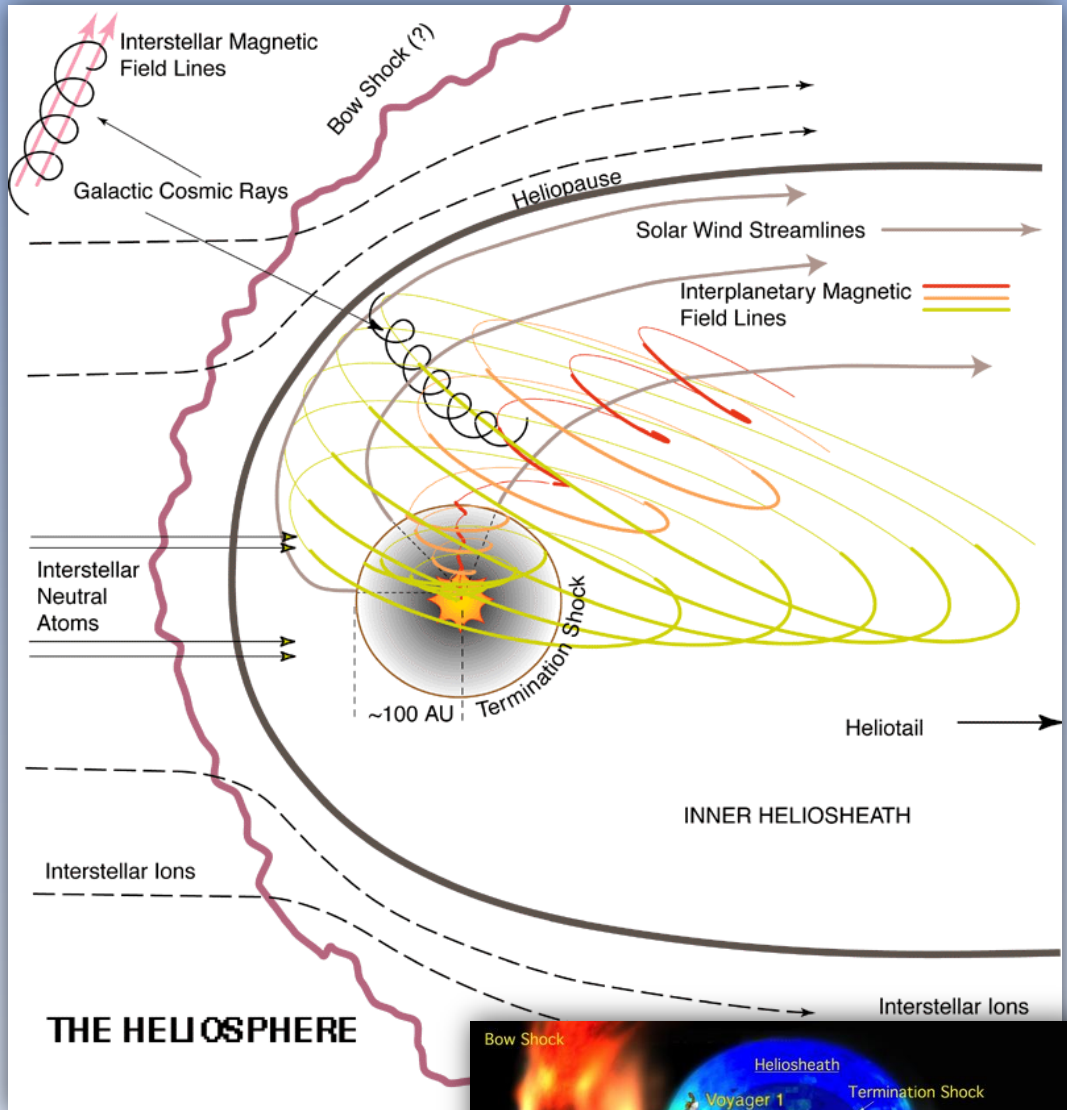
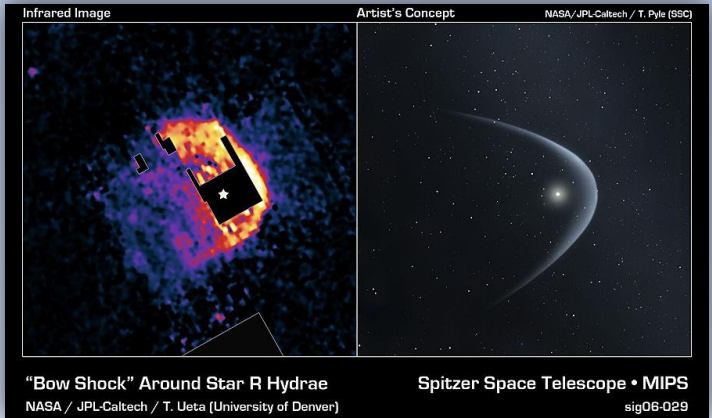


obłok Öpika-Oorta

wewnętrzny i zewnętrzny (oszacowania): 2000 – 50000 AU (100000 AU)

Układ Słoneczny – przegląd

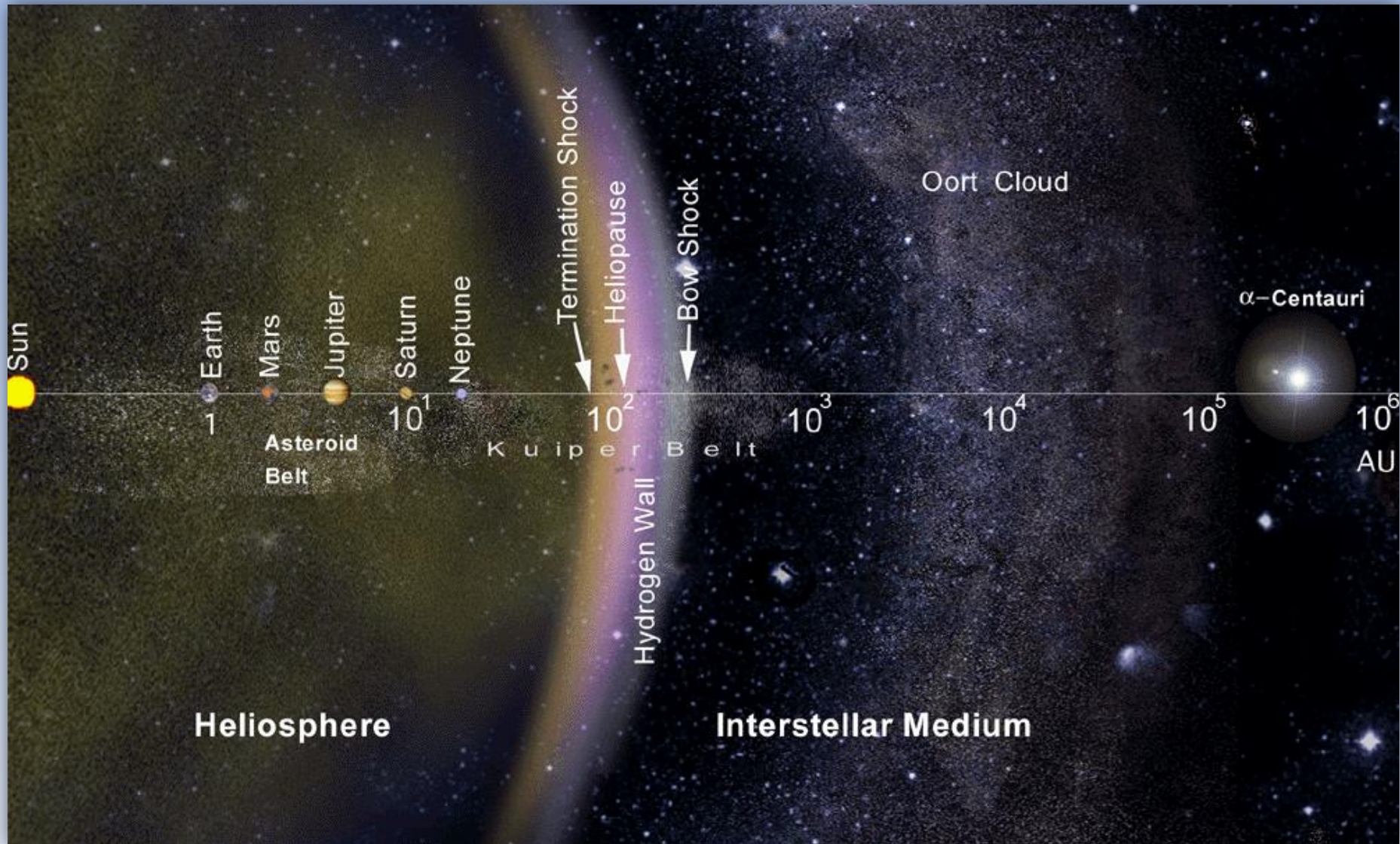
granice układu słonecznego



heliosfera

- końcowa fala uderzeniowa (termination shock): 75 – 90 AU (Voyager 1,2)
- heliopauza (heliopause): 120 (Voyager 1,2)
- łukowa fala uderzeniowa (bow shock): 230 AU (?)

Układ Słoneczny – przegląd



Układ Słoneczny – właściwości obiektów



Co możemy dostać z obserwacji i jak je wykonać?

Układ Słoneczny – właściwości obiektów

Skąd wiemy to, co wiemy:

- pomiary z powierzchni Ziemi, orbity okołoziemskiej
- pomiary z sond i lądowników

Co wiemy z obserwacji:

- orbita
- masa i jej rozkład
- rozmiar
- obrót i jego kierunek
- kształt
- temperatura
- pole magnetyczne
- skład chemiczny i struktura powierzchni
- skład chemiczny i struktura atmosfery



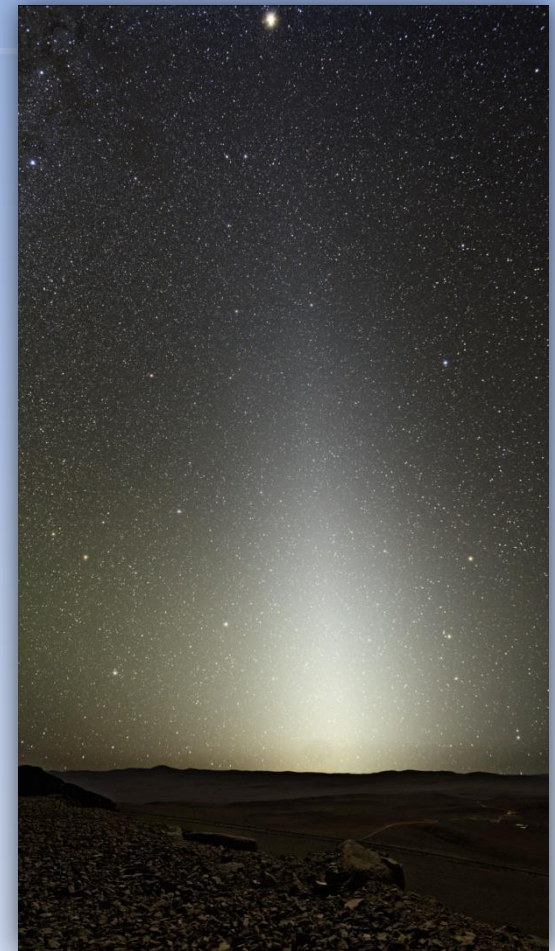
Dodając do cech obserwowanych porcję fizyki i modeli teoretycznych otrzymamy:

- skład chemiczny całego ciała
- jego budowę wewnętrzną

Układ Słoneczny – właściwości obiektów

orbita:

- ruch ciał w układzie planetarnym opisują prawa Keplera, które wynikają z dynamiki i grawitacji newtonowskiej;
- orbita keplerowska definiuje 6 parametrów:
 - *mimośród (e), półoś wielka orbity (a), inklinacja (i), długość węzła wstępującego (Ω), długość perycentrum (ϖ), anomalia prawdziwa (f)*
- lub
- *współrzędne xyz i 3 składowe wektora prędkości;*
- wszystkie planety i planetoidy okrążają Słońce w tym samym kierunku i w prawie tej samej płaszczyźnie; podobnie jest w przypadku orbit większości dużych księżyców względem planet macierzystych;
- płaskość układu planetarnego jest obserwacyjnym dowodem na to, że powstał on z dysku

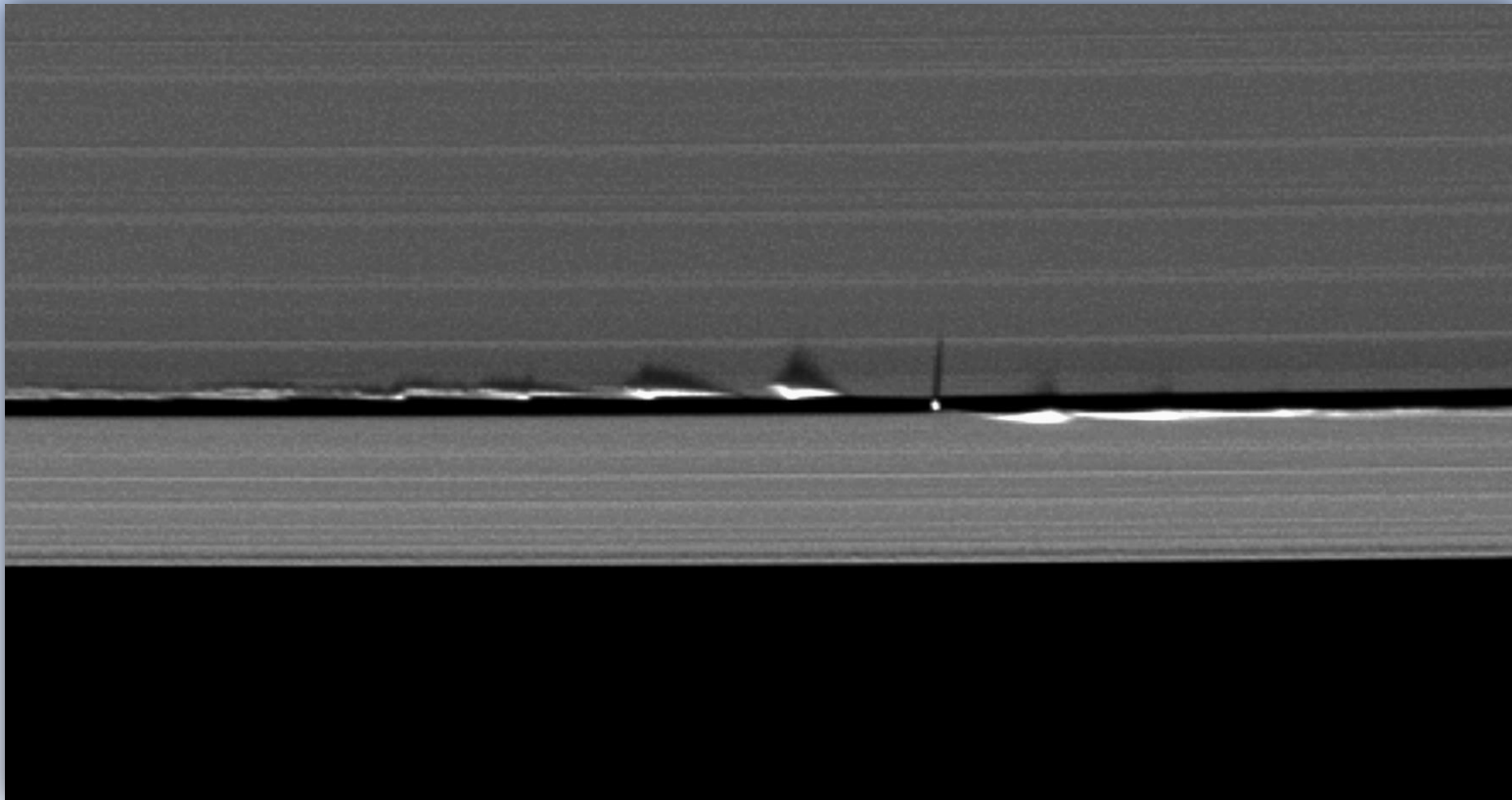


Układ Słoneczny – właściwości obiektów

masa

masę ciała poznamy po sile grawitacji, którą działa ono na:

- własne księżyce;
- na inne obiekty okrążające to samo centrum grawitacji (Słońce, planetę, ...);
- sondy międzyplanetarne (przelatujące, orbitery);
- „gruz” budujący pierścienie planetarne (księżyce pasterskie Saturna)



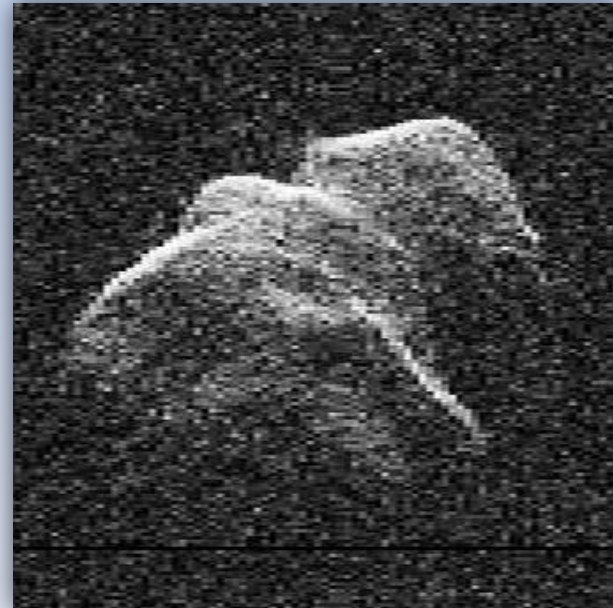
Układ Słoneczny – właściwości obiektów

rozmiar

Rozmiar obiektu możemy określić:

- znając jego rozmiary kątowe i odległość;
- obserwując zakrywanie przez niego gwiazd;
- mierząc odbite od niego fale radiowe (otrzymamy też kształt);
- używając triangulacji z wykorzystaniem orbitera i lądownika;
- mierząc ilość odbitego przez nie światła (musimy znać albedo).

Rozmiar i masa ciała daje nam prosty, ważny parametr – **średnią gęstość**, dający ogólną informację o budowie wewnętrznej tego ciała.



Układ Słoneczny – właściwości obiektów

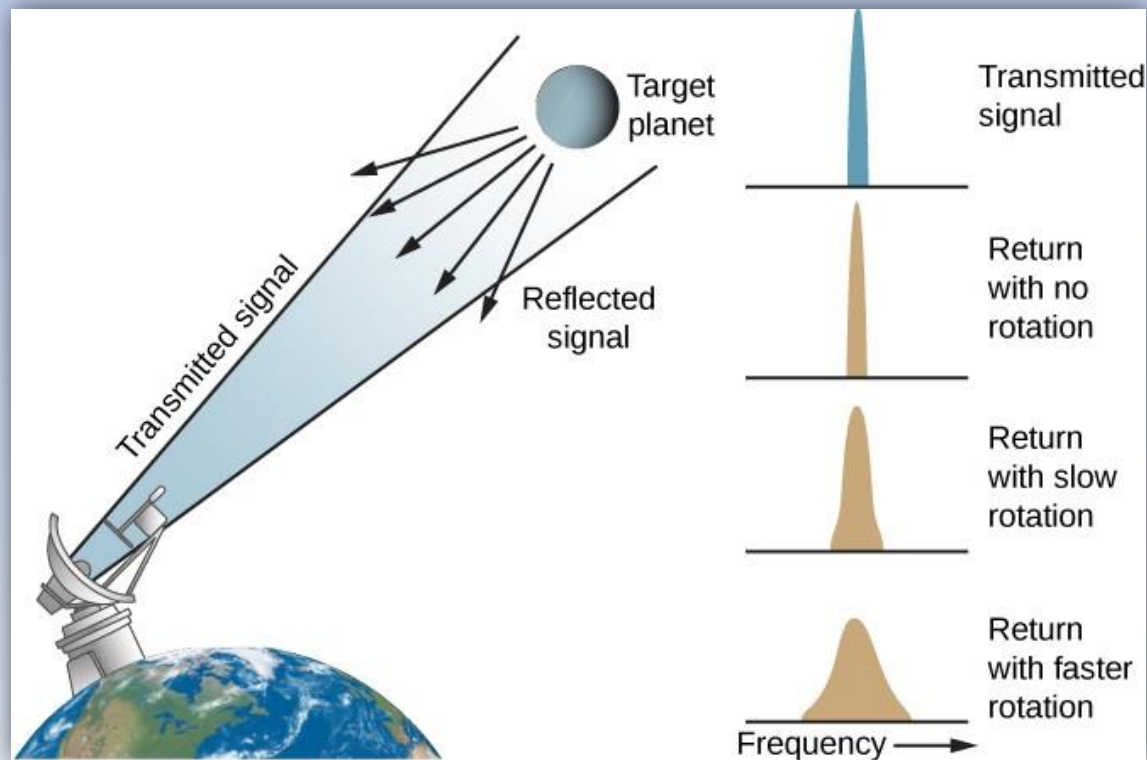
obrót

Tempo obrotu ciała możemy wyznaczyć obserwując:

- utwory na jego powierzchni
- okresowe zmiany jego jasności
- okresowe zmiany sygnału radiowego – źródło: jony uwięzione w magnetosferze
- przesunięcie dopplerowskie biernie (światło widzialne) lub aktywnie (radar)

Z obserwacji wynika, że:

- okresy obrotu obiektów wynoszą od kilku godzin do wielu dni;
- kierunek obrotu może być prosty lub wsteczny



Układ Słoneczny – właściwości obiektów

kształt

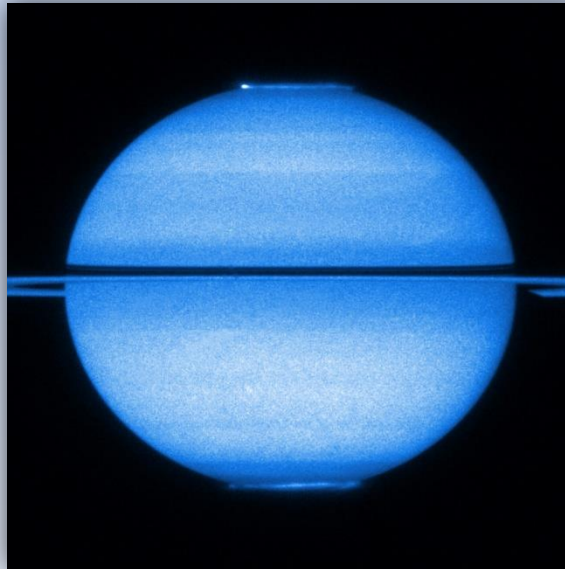
Kształt ciała zależy od masy, budowy wewnętrznej, rotacji i pływów:

- własna grawitacja dąży do osiągnięcia min. energii potencjalnej (kulistość);
- wytrzymałość materiałów budulcowych utrzymuje nieregularności kształtu;
- rotacja prowadzi do spłaszczenia ciała ($\varepsilon = (R_r - R_b)/R_r$)

Kształt kulisty pojawia się dla obiektów o średnicy większej niż około 400-900 km

Kształt ciała możemy określić w następujący sposób:

- obrazowanie
- obserwacja zakryć gwiazd
- pomiary odbitych fal radiowych
- analiza krzywych blasku



Układ Słoneczny – właściwości obiektów

temperatura

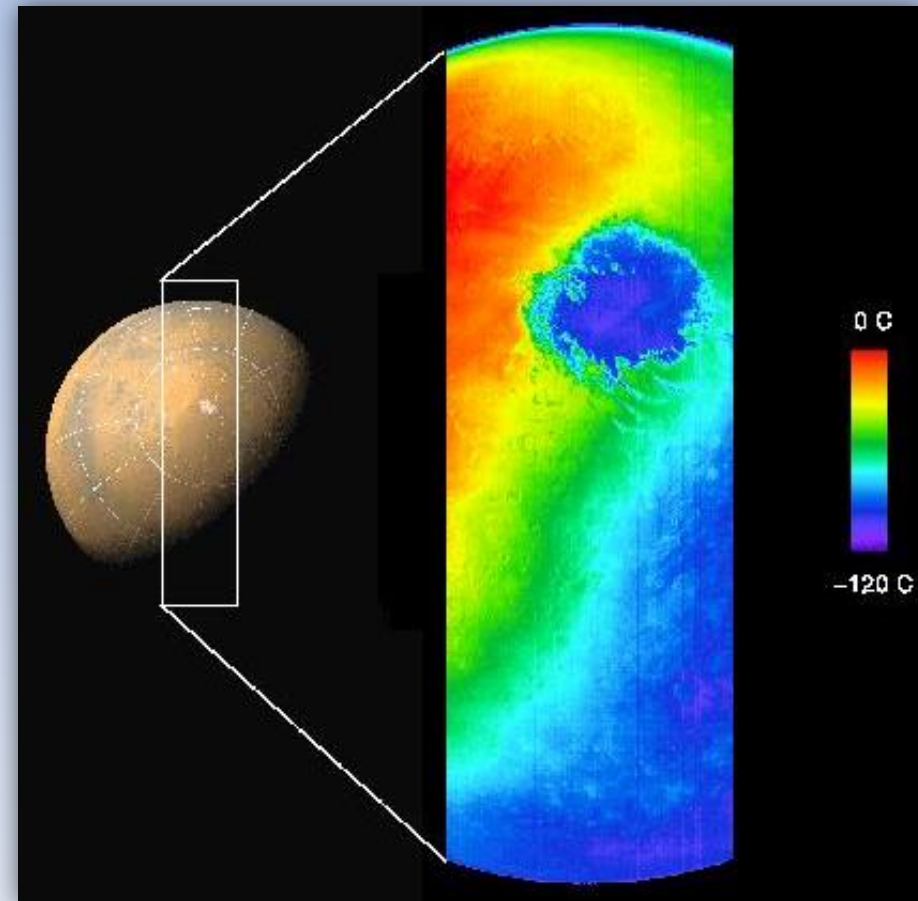
Temperatura równowagowa ciała wynika z równowagi między energią pochłanianą (światło słoneczne) a wypromieniowaną z powrotem w przestrzeń. Odchylenia o tej temperatury powodują:

- wewnętrzne źródła energii;
- obecność atmosfery (efekt cieplarniany)

Rzeczywista temperatura na powierzchni ciała podlega też zmianom dobowym, rocznym i zależy od miejsca.

Temperaturę ciała możemy określić w następujący sposób:

- pomiar na miejscu (lądowniki)
- analiza emitowanego widma (podczerwień)



Układ Słoneczny – właściwości obiektów

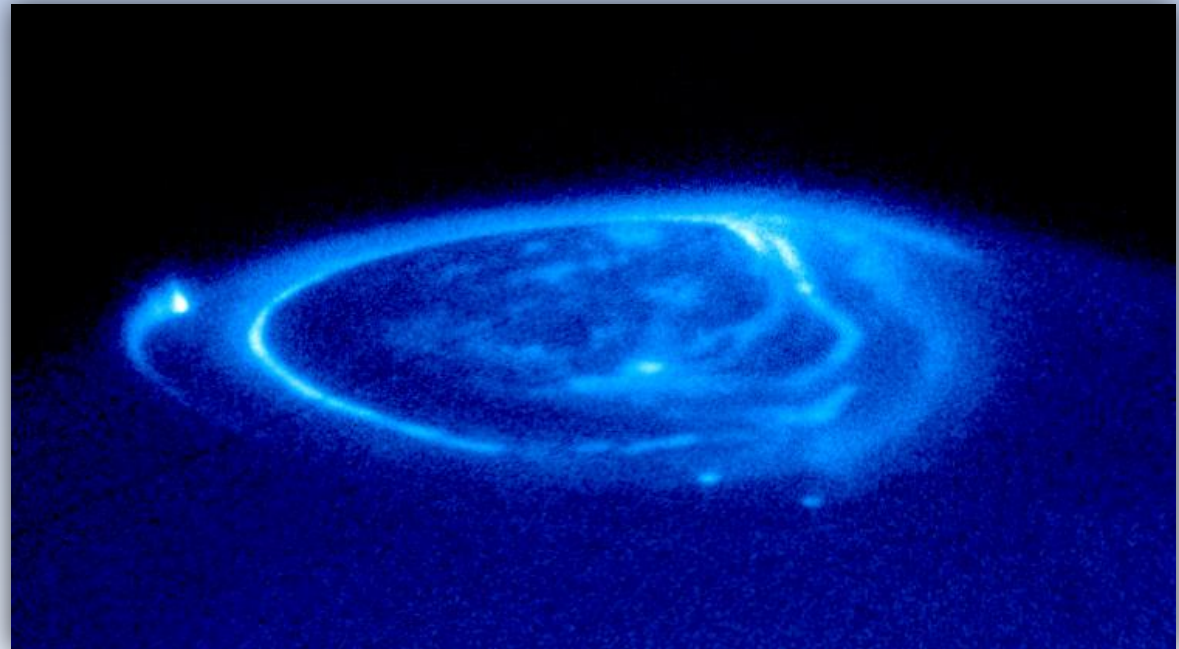
pole magnetyczne

Pola magnetyczne obiektów mogą być:

- generowane w ich wnętrzach (dynamo) [planety olbrzymy, Ziemia, Merkury, Ganimedes]
- utrwalone w skałach (magnetyzacja szczątkowa) [Mars, Księżyc]
- wytwarzane przez interakcję atmosfery (jonosfery) z wiatrem słonecznym [Wenus]

Pole magnetyczne możemy wykryć poprzez:

- pomiar na miejscu (sondy, orbitery)
- detekcję fal radiowych emitowanych przez jony uwięzione w magnetosferze
- obserwację zórz polarnych

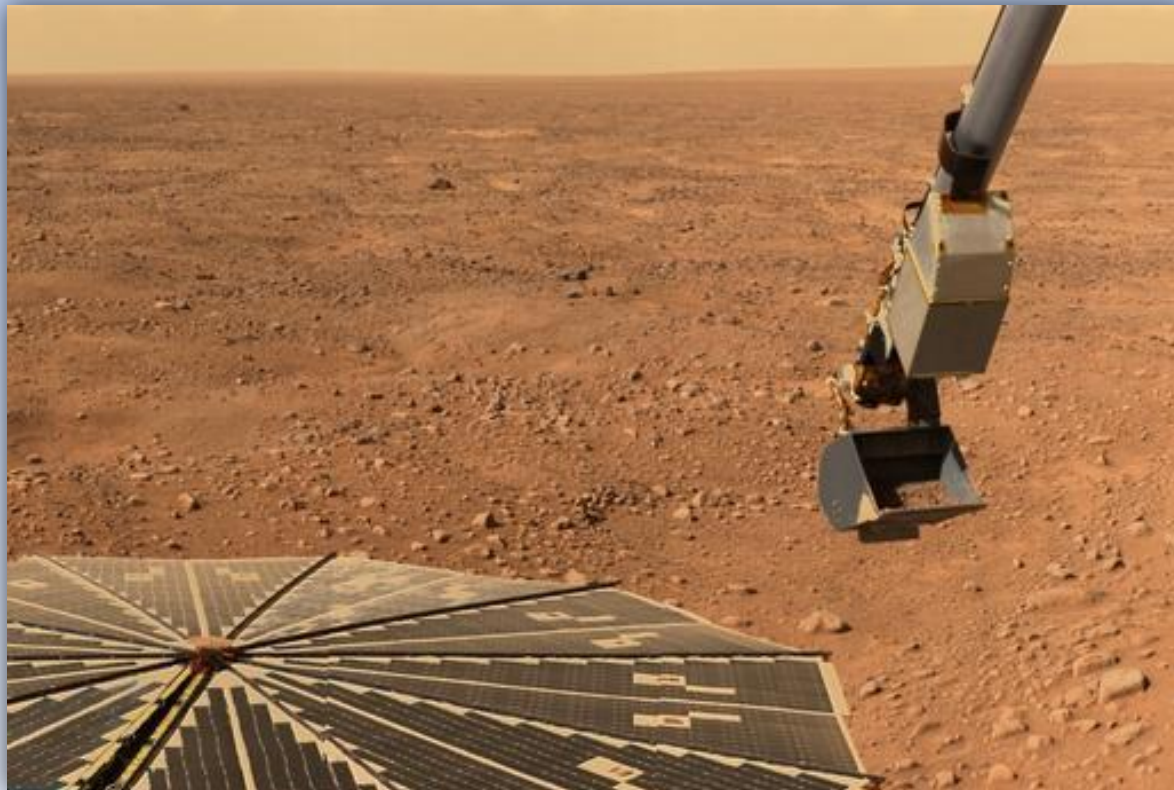


Układ Słoneczny – właściwości obiektów

skład chemiczny powierzchni

Dane na temat składu chemicznego powierzchni otrzymujemy z:

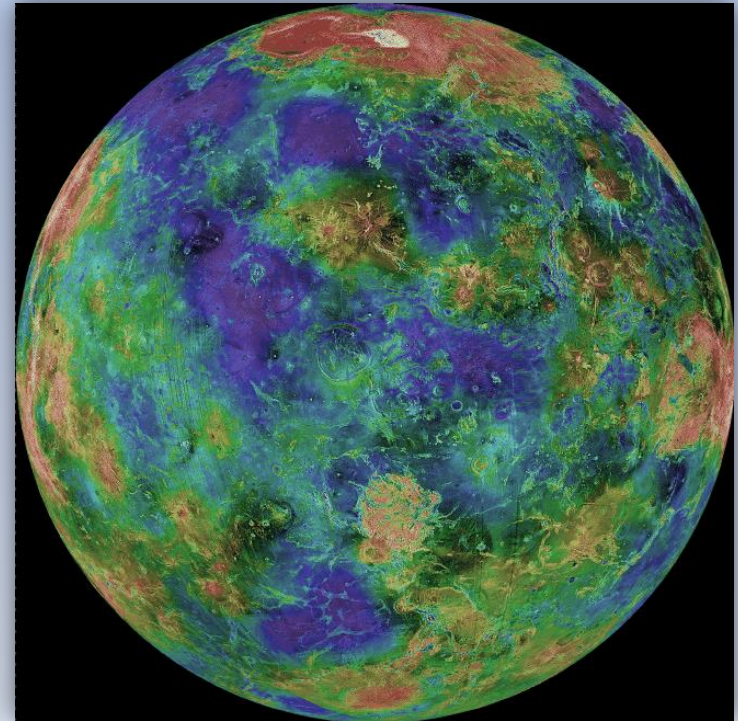
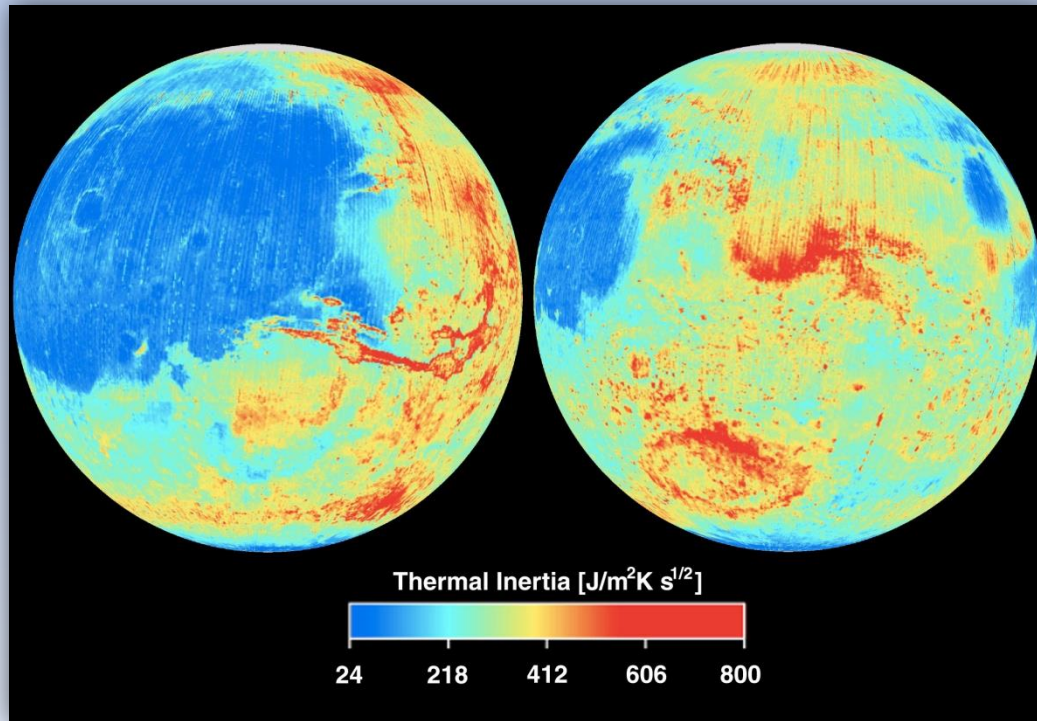
- analizy widm (światło odbite, emisja własna, echo radarowe)
- badania próbek gruntu (meteoryty, pobranie próbek, lądowniki)



Układ Słoneczny – właściwości obiektów

struktura powierzchni

- wielkoskalową strukturę powierzchni (góry, kratery) znamy na podstawie obrazów (obrazowanie bierne lub aktywne)
- drobnoskalową strukturę powierzchni (rozmiar materiału) możemy zbadać za pomocą lądowników lub metodami pośrednimi takimi jak analiza bezwładności cieplnej lub efektu opozycji



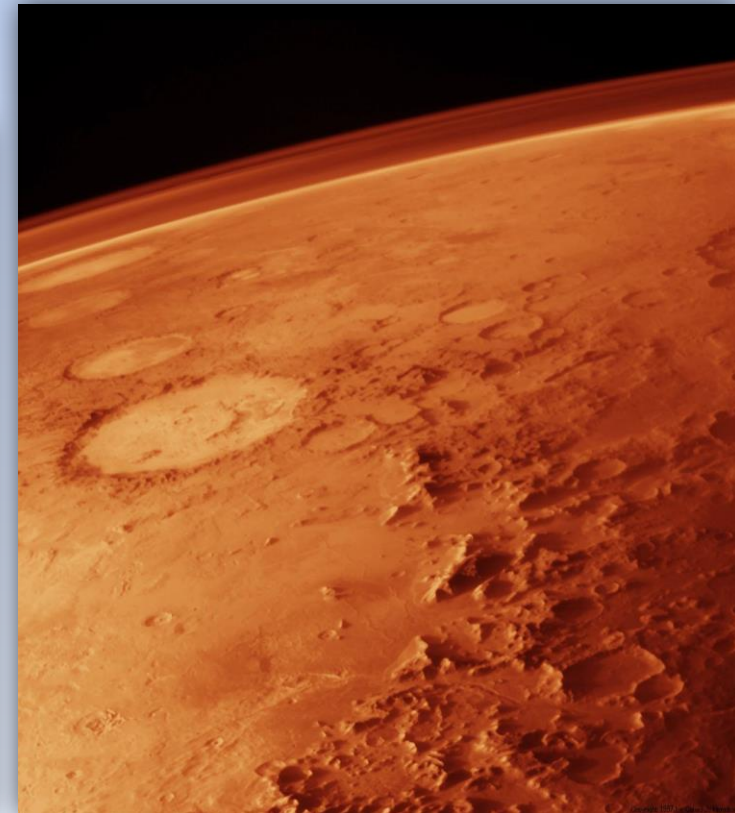
Układ Słoneczny – właściwości obiektów

atmosfera

Większość planet i niektóre księżyce posiadają znaczące atmosfery. Różnorodność jest duża, od ogromnej atmosfery H-He Jowisza, poprzez Ziemią atmosferę zawierającą tlen, po rzadką atmosferę Marsa.

Strukturę i skład atmosfery badamy wykorzystując:

- pomiar na miejscu (lądowniki)
- analizę widmową
- zakrycia gwiazd



Układ Słoneczny – właściwości obiektów

wnętrze

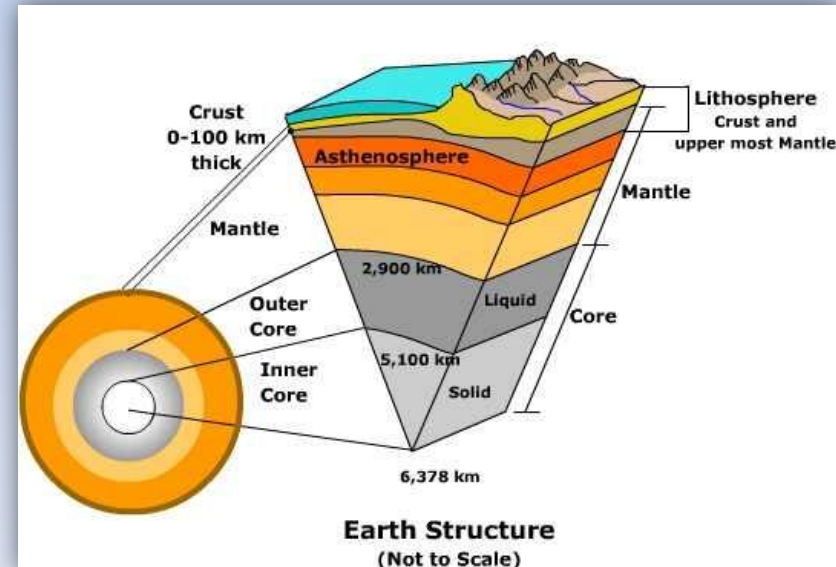
Struktura wewnętrzna i skład chemiczny całości obiektu nie są dostępne dla bezpośrednich obserwacji (z wyjątkiem meteorytów). Informacji o tych cechach dostarczają nam obserwowane właściwości obiektu, np.:

skład chemiczny

- masa i rozmiar (*śr. gęstość*), skład powierzchniowy, odległość od Słońca (*różnice w składzie chemicznym dysku protoplanetarnego*)

struktura wewnętrzna

- pole grawitacyjne i rotacja (*stopień koncentracji masy ku centrum*)
- fale sejsmiczne (Ziemia, Księżyc, Mars)
- utwory wulkaniczne, tektonika płyt
- emisja energii z własnego źródła
- odkształcenia wywołane pływami (księżyce)
- obecność silnego pola magnetycznego i jego konfiguracja



Układ Słoneczny – Sol omnia regit

Słońce – gwiazda centralna Układu Słonecznego

- źródło pola grawitacyjnego ‘napędzające’ ruch innych ciał
- źródło energii dla powierzchni obiektów
- źródło energii dla procesów atmosferycznych
- źródło strumienia cząstek naładowanych (wiatr słoneczny) wpływającego na magnetosfery
- jedna z przyczyna zróżnicowania w Układzie Słonecznym

